

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи



Эсаулов Вячеслав Александрович

**МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПУСКА
ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА ГРУЗОНАПРЯЖЕННОМ НАПРАВЛЕНИИ
ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

2.9.4. Управление процессами перевозок

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Давыдов Борис Израильевич

Хабаровск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ.....	13
1.1 Анализ выполнения расписания движения грузовых поездов.....	13
1.2 Состояние исследований в области построения графиков движения.....	16
1.2.1 Состояние исследований в области построения сводных (нормативных) графиков движения.....	16
1.2.2 Состояние исследований в области построения вариантных (оперативных) графиков движения.....	32
1.2.3 Состояние исследований в области организации жестко- и виртуально-сцепленных поездов	36
1.3 Сценарии формирования графика движения поездов.....	39
1.4 Постановка задач исследования.....	41
Результаты по первой главе.....	44
2. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕГОННЫХ ВРЕМЕН ХОДА НА ГРУЗОНАПРЯЖЕННОМ НАПРАВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ.....	46
2.1 Вероятностный подход к определению элементов графика движения поездов.....	46
2.2 Исходные положения расчета перегонных времен хода.....	49
2.3 Обеспечение выполнения расписания при организации движения виртуально-сцепленных поездов.....	51
2.4 Обеспечение выполнения расписания при организации движения жестко-сцепленных поездов.....	55
2.5 Методика вероятностного анализа и расчета времени хода поездов и ее практическое применение.....	57
2.6 Использование технологии больших данных в задачах оптимизации транспортных процессов.....	65

2.7 Автоматизация сбора, накопления, сортировки и обработки данных для расчета элементов графика движения.....	67
2.7.1 Схема автоматизированного формирования перегонных времен хода.....	67
2.7.2 Алгоритм накопления, сортировки и обработки данных.....	69
Результаты по второй главе.....	71
3. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖПОЕЗДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	73
3.1 Исходные положения по определению межпоездных интервалов.....	73
3.2 Методика анализа статистических данных об исполненном движении, ее практическое применение	78
3.3 Влияние межпоездных интервалов на время хода поездов грузового вида движения.....	80
3.4 Данные о выполнении межпоездных интервалов при организации движения виртуально-сцепленных поездов.....	84
3.5 Модель размножения задержек в потоке поездов после сбоя в движении.....	88
Результаты по третьей главе.....	92
4. ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОВОГО ДВИЖЕНИЯ.....	94
4.1 Оценка энергопотребления одиночно следующих поездов с различными скоростными характеристиками.....	94
4.2 Оценка энергопотребления жестко- и виртуально-сцепленных поездов.....	96
4.3 Базовые эксперименты по пропуску сдвоенных поездов.....	98
Результаты по четвертой главе.....	100

5. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ ГРАФИКА ИСПОЛНЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ПУНКТУАЛЬНОСТИ.....	102
5.1 Исходные положения к разработке экономического показателя оценки графика исполненного движения.....	102
5.2 Методы оценки качества исполненного движения на основе выполнения сроков доставки.....	109
5.3 Показатель коэффициента экономической эффективности.....	114
5.4 Методика практического использования коэффициента экономической эффективности.....	118
Результаты по пятой главе.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Акт о внедрении результатов диссертационной работы.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 График движения (вариантный) на диспетчерском участке Облучье-Хабаровск, разработанный на основе вероятностного подхода.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Важнейшие задачи национального перевозчика – ОАО «Российские железные дороги» – это поддержание высокого качества транспортной услуги и повышение эффективности перевозочного процесса. Требованием грузовладельца к компании-перевозчику является точность доставки, что обеспечивает реализацию глобальных логистических цепочек. Движение поездов по графику выполнить сложно вследствие наличия случайных влияний, приводящих к возникновению нарушений скоростного режима и неграфиковых остановок. Отклонения сопровождаются экономическими потерями – штрафами за просрочку доставки грузов и ростом эксплуатационных расходов, в первую очередь, затрат на топливо (энергию).

Указанные трудности устраняются путем оптимизации управления ходом перевозочного процесса, построения отказоустойчивого графика движения. Вопросы совершенствования управления движением пассажирских поездов исследователями успешно решаются с использованием методов и средств интеллектуальной поддержки работы диспетчерского персонала. В то же время, существуют значительные пробелы в области управления потоком грузовых поездов. Это делает решение вопросов построения эффективного графика движения, нацеленного на достижение высокого уровня надежности и экономичности, весьма актуальным. Своевременность рассмотрения задач совершенствования управления грузовым движением также определяется возросшим требованием увеличения пропускной способности основных магистральных направлений железных дорог. В перспективе до 2025 г. протяженность «узких мест» Восточного полигона сети ОАО «РЖД» (участков с заполнением пропускной способности выше допустимого уровня) составит 10 000 км, или 90 проц. общей протяженности [12].

Ведущими исследователями транспортной отрасли изыскиваются пути совершенствования железнодорожного перевозочного процесса посредством ускорения доставки, повышения уровня маршрутизации вагонопотока [5],

специализации ниток графика по видам отправок и назначений при обеспечении перевозок устойчивыми маршрутными отправлениями и ускоренными грузовыми поездами [4], оптимизации плана формирования, повышения уровня транзитных, однопутных поездов [8]. Процесс также модернизируется посредством разработки научно-методических и организационно-технических решений по предотвращению затруднений в эксплуатационной работе за счет применения полигонных принципов управления, вариантных технологических режимов, комплексных технологий транспортных узлов [52]. В частности, весьма эффективным оказывается рациональное распределение средств локомотивной тяги на полигоне [43]. Важным элементом повышения качества перевозок является развитие системы диспетчерского руководства [38].

В настоящей работе основное внимание сфокусировано на разработке устойчивого графика движения поездов – создание в нем определенных резервов, позволяющих ликвидировать сбои в условиях повышения интенсивности поездопотока. Следует отметить, что вопрос соблюдения расписания в грузовом сегменте перевозок особенно актуален в настоящее время, когда растет объем контейнерных перевозок. Задача соблюдения графика усложняется при попытках интенсифицировать движение поездов путем внедрения технологий сдвоенного пропуска. Это требует углубленного исследования вопросов рационального построения и выполнения графика движения.

Степень разработанности. Вопросы организации и управления движением поездов исследуются учеными России и других ведущих стран мира. Стратегические методы совершенствования технологий эксплуатационной работы железнодорожного транспорта раскрыты в трудах Апатцева В.И., Баранова Л.А., Бородина А.Ф., Горелика В.Ю., Шарова В.А и других ученых.

Проблеме разработки графика движения поездов уделено большое внимание в трудах Абрамова А.А., Давыдова Б.И., Елисеева С.Ю., Каретникова А.Д., Климанова В.С., Козырева С.В., Кочнева Ф.П., Левина Д.Ю., Сидоренко В.Г., Сотникова Е.А., Уманского В.И., Goverde R., Huisman T. и ряда других исследователей.

Вопросы интервального регулирования, в том числе, с использованием современных технологий автоматизации, рассматривали Бестемьянов П.Ф., Бушуев С.В., Климова Е.В., Оленцевич В.А., Розенберг Е.Н., Шабалин Н.Г. и ряд других исследователей.

Проблему повышения энергоэффективности путем улучшения организации движения, построения оптимального графика исследовали Баранов Л.А., Горелик В.Ю., Давыдов Б.И., Дубровин И.Н., Кузнецов В.Г., Розенберг Е.Н., Юренко К.И., Roberts К. и другие ученые.

На основании анализа научной литературы можно сделать вывод: проблема формирования нормативного (сводного) и вариантного (оперативного) графиков движения, нацеленных на повышение точности прибытия поездов грузового вида движения на станции, ограничивающие участок, остается недостаточно изученной. В диссертационном исследовании основное внимание уделено разработке методических вопросов корректировки движения путем изменения графиковых нормативов и рационального использования технологии спаренного пропуска поездов. Это позволяет повысить пунктуальность движения и улучшить экономические показатели компании-перевозчика.

Объектом исследования служат транспортные и информационные потоки, системы управления на железнодорожном транспорте.

Предметом исследования является планирование (долгосрочное и оперативное), управление потоками транспортных средств; технология организации транспортных процессов.

Целью работы является поиск путей повышения экономической эффективности в сегменте грузового движения при организации перевозок на грузонапряженных двухпутных линиях посредством корректировки нормативов графика движения, использования технологий спаренного пропуска поездов, а также исключения взыскания пени за нарушение нормативных сроков доставки.

Указанная цель предопределила постановку следующих основных задач диссертационной работы:

– проведение анализа существующих отечественных и зарубежных научных работ, связанных с разработкой графика движения поездов, использованием методов интервального регулирования, а также повышением энергоэффективности перевозочного процесса;

– исследование влияния интенсивности грузового потока на показатель точности соблюдения графика при реализации режимов одиночного следования, движения жестко-сцепленных и виртуально-сцепленных грузовых поездов (ВСЦ);

– проведение анализа энергопотребления при использовании различных режимов пропуска поездов грузового вида движения, в том числе, при режимах спаренного пропуска;

– разработка и обоснование методики формирования перегонных, участковых времен хода с учетом реальной ситуации посредством вероятностного подхода;

– оценка влияния межпоездных интервалов по отправлению с технической станции на элемент времени хода грузовых поездов, в том числе, с применением технологии виртуального сцепления поездов;

– оценка эффективности, предложение условий реализации спаренного пропуска грузовых поездов по линии с высоким заполнением пропускной способности;

– разработка показателя и методики оценки экономической эффективности графика исполненного движения грузовых поездов с учетом соблюдения нормативных сроков доставки.

Таким образом, диссертационное исследование направлено на повышение итоговой результативности процесса перевозок посредством использования экономически эффективного графика движения поездов, обоснования способов, вариантов и условий спаренного пропуска грузовых поездов, а также повышения уровня надежности выполнения сроков доставки. Корректировка элементов графика производится на основе статистической обработки массивов данных о реальном движении поездов.

Научная новизна заключается в следующем:

– обоснован математический подход к разработке базовых элементов графика движения в условиях повышения интенсивности потока, а также применения современных технологий интервального регулирования;

– определены сферы применения технологий спаренного пропуска грузовых поездов, а также объединения контейнерных поездов в условиях интенсивного потока;

– обосновано отсутствие технологических и экономических преимуществ одних технологий сдваивания поездов перед другими;

– сформирована методика математического расчета базовых элементов графика движения на грузонапряженном направлении железной дороги;

– исследованы характеристики исполненного движения виртуально- и жестко-сцепленными поездами;

– разработаны предложения по повышению эффективности использования современной технологии интервального регулирования «виртуальная сцепка» в условиях высокого заполнения пропускной способности участков;

– разработан экономический показатель оценки качества перевозочного процесса, основанный на соблюдении нормативных сроков доставки грузов, характеризующий регулировочные решения, принятые на отдельно взятом диспетчерском участке, районе управления или дороге в целом.

Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования:

– определены закономерности влияния интенсивности потока на показатели качества перевозочной деятельности, которые необходимо учитывать при разработке графика движения поездов и применении методов повышения пропускной способности грузонапряженных участков;

– исследованы характеристики энергопотребления при различных режимах пропуска грузовых поездов по участку, что позволяет обосновывать необходимость корректировки элементов графика движения поездов с учетом энергоэффективности процесса движения;

– проведен анализ научных источников, позволяющий сделать вывод о существовании разных подходов к организации движения грузовых поездов и формированию графика движения поездов; в настоящей работе существующий эвристический подход к разработке графика совершенствуется путем использования методов вероятностного моделирования. Разработанная методика расчета элементов графика с учетом вероятностных характеристик обеспечивает высокую эффективность движения в условиях повышения грузонапряженности железной дороги;

– сформулирован показатель экономического результата регулировочных действий, позволяющий оценить качество движения на диспетчерском участке, районе управления и дороге в целом с учетом соблюдения нормативных сроков доставки грузов;

– предложен комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на совершенствование перспективной технологии организации движения виртуально-сцепленных поездов.

Методология и методы исследования. В основу диссертационного исследования положены методы моделирования транспортных процессов, спаренного пропуска грузовых поездов, статистического анализа больших массивов данных, а также экономического оценивания результатов деятельности субъекта перевозочной деятельности.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты теоретического обоснования вероятностного подхода к разработке базовых элементов графика движения на основе российского и зарубежного опыта;

– методика формирования межпоездных интервалов в условиях применения технологий интервального регулирования;

– условия применения современных технологий спаренного пропуска грузовых поездов;

– методика определения перегонных, участковых времен хода с учетом реальной эксплуатационной ситуации;

- обоснование наличия корреляционной связи между межпоездными интервалами при отправлении с начальной станции участка и временами хода поездов в условиях интенсивного потока, в том числе, в ходе применения технологии организации движения ВСЦ поездов;

- предложения по совершенствованию технологий спаренного пропуска грузовых поездов, в том числе, технологии организации пропуска ВСЦ поездов;

- методика оценки графика исполненного движения по критерию точности соблюдения расписания.

Достоверность результатов исследований подтверждается соответствием общих выводов, полученных в диссертации, частным выводам, которые содержатся в предшествующих работах. Кроме того, присутствует хорошее совпадение результатов, полученных в ходе моделирования движения поездов, с показателями, которые характеризуют реальное движение.

Апробация результатов исследования. Основные идеи, положения и предложения, раскрытые в диссертации, представлялись, обговаривались и получили положительную оценку на следующих международных и всероссийских научных конференциях:

- VII научная конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ)», г. Москва, 2018 г.;

- Международная научная конференция ICCSA-2019, г. Санкт-Петербург, 2019 г.;

- Международная научно-практическая конференция FarEastCon-2019, г. Владивосток, 2019 г.;

- Восьмая научная конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ)», г. Москва, 2019 г.;

- Международная научная конференция «Открытые эволюционирующие системы: цифровая трансформация», г. Хабаровск, 2022 г.

Результаты исследований представлены на соискание гранта ОАО «РЖД» в рамках конкурса молодых ученых в 2019 г., а также на XXIII краевой конкурс молодых ученых, г. Хабаровск, 2021 г. Вопросы, разрабатываемые в диссертации,

обсуждались на заседаниях кафедр «Организация перевозок и безопасность на транспорте» и «Автоматика, телемеханика и связь» ДВГУПС в течение 2019-2022 гг.

Ряд результатов диссертационного исследования используется на Восточном полигоне сети дорог ОАО «РЖД» при совершенствовании организации движения. В частности, реализуется процесс гибкого присвоения нитки графика в зависимости от эксплуатационной обстановки, что позволяет существенно улучшить показатели пропусков в периоды длительных «окон» для плановых видов ремонта инфраструктуры.

Структура и объем диссертации. Работа включает в себя введения, пять глав, заключение, список используемой литературы, включающий 107 наименований, 2 приложения, 18 рисунков, 12 таблиц. Общий объем рукописи – 138 страниц.

1 АНАЛИЗ МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

1.1 Анализ выполнения расписания движения грузовых поездов

В ходе исследования проведен сравнительный анализ выполнения расписания грузовыми составами на сети дорог в целом, а также в пределах Дальневосточной железной дороги. Данный анализ выполнен для грузового вида движения с разделением категорий поездов – договорные и недоговорные. Следует отметить, что за каждую нитку договорного поезда компанией ОАО «Российские железные дороги» взимается дополнительная плата. Предполагается, что каждый договорной поезд следует строго по расписанию, соответственно, обеспечивается четкое планирование подвода груза, рациональное использование складских емкостей и трудовых ресурсов.

Согласно официальной отчетности ОАО «РЖД», за последние восемь лет максимальный график по отправлению грузовых поездов, следующих на договорной основе, составил 95,5 проц. (2016 г.) по сети и 95,59 проц. (2016 г.) на Дальневосточной железной дороге, при этом наибольшую точность по прибытию данной категории поездов сеть достигла в 2020 г. с выполнением расписания на уровне 48,96 проц. Дальневосточная железная дорога в 2021 г. достигла максимальной точности расписания договорных поездов, выполнив график на уровне 20,13 проц.

Минимальное значение графика отправления грузовых поездов, следующих на договорной основе, достигнуто сетью в 2014 г. – 59,35 проц., Дальневосточной железной дорогой минимальный процент по отправлению составил 42,46 проц. в 2018 г. При этом наименьший параметр пунктуальности по прибытию наблюдается в 2014 г. для сети – 13,96 проц., и в 2015 г. для Дальневосточной железной дороги – 1,14 проц.

Рассматривая остальные грузовые поезда, на которые не распространяются дополнительные договорные обязательства, максимальный уровень отправления

по графику достигнут сетью в 2020 г. За год данный параметр выполнен на уровне 93,19 проц. На Дальневосточной железной дороге максимальный параметр отправления составил 87,50 проц. в 2020 г. Наибольший процент по прибытию сеть достигла в 2020 г. – 64,60 проц., Дальневосточная железная дорога – в 2021 г. – 62,73 проц.

Минимальное значение графика отправления данной категории поездов сетью достигнуто в 2014 г. Процент выполнения расписания по отправлению составил 50,82 проц. Минимальное значение графика по отправлению на Дальневосточной железной дороге наблюдается в 2014 г. Процент выполнения расписания составил 45,62 проц. Наименьшее значение выполнения расписания по прибытию для сети составляет 18,64 проц. (2014 г.), для Дальневосточной железной дороги – 11,78 проц. (2014 г.).

Отчетные данные сформированы за восемь лет с 2014 по 2021 гг., приведены в таблицах 1 и 2 для сети дорог и Дальневосточной железной дороги соответственно.

Таблица 1 – Отчетные данные по выполнению расписания движения грузовых поездов сетью железных дорог России

год	Сеть			
	договорные		исключая договорные	
	отправление	прибытие	отправление	прибытие
2014	59,35	13,96	50,82	18,64
2015	94,48	28,94	71,61	25,80
2016	95,50	29,13	60,92	31,28
2017	91,27	48,78	84,94	64,47
2018	81,96	45,32	85,90	57,11
2019	77,90	43,60	89,59	56,95
2020	90,34	48,96	93,19	64,60
2021	88,63	44,21	91,90	62,17

Таблица 2 – Отчетные данные по выполнению расписания движения грузовых поездов Дальневосточной железной дорогой

год	ДВОСТ			
	договорные		исключая договорные	
	отправление	прибытие	отправление	прибытие
2014	89,03	1,25	45,62	11,78
2015	87,77	1,14	75,76	19,11
2016	95,59	5,19	77,24	24,12
2017	90,60	14,56	87,33	51,03
2018	42,46	10,62	83,33	51,29
2019	50,18	14,10	87,31	49,73
2020	84,42	14,67	87,50	56,67
2021	89,58	20,13	84,06	62,73

Из отчетных данных, приведенных в таблицах 1 и 2 ярко видно, что точность выполнения расписания в сегменте грузовых перевозок находится на крайне низком уровне. Приведенные цифры говорят о низкой надежности разрабатываемых нормативных графиков в современных условиях перевозочного процесса.

Обращая внимание на процент по прибытию договорных и недоговорных поездов, наблюдается парадоксальная ситуация – поезда, следующие на договорной основе, которым уделяется пристальное внимание на всех уровнях диспетчерского управления, прибывают на конечные пункты на уровне, кратно ниже процента прибытия недоговорных поездов. Так, в 2014 г., на Дальневосточной железной дороге процент по прибытию договорных поездов составил 1,25 проц., процент по прибытию остальных поездов составил 11,78 проц. Разница в 9,4 раза. Данная ситуация складывается из текущей системы присвоения нумерации грузовым поездам и лишь подтверждает субъективность действующей системы разработки нормативного расписания.

Таким образом, проведенный анализ побуждает автора к поиску новых решений, связанных с разработкой нормативного расписания движения грузовых поездов.

1.2 Состояние исследований в области построения графиков движения

1.2.1 Состояние исследований в области построения сводных (нормативных) графиков

График движения поездов в сфере железнодорожных перевозок определяется как основополагающий документ, координирующий деятельность всех подразделений, дирекций и служб, участвующих в организации перевозочного процесса [49]. Проблеме разработки графика движения поездов и его элементов уделено большое внимание в трудах следующих ученых: Апатцева В.И., Горелика В.Ю., Каретникова А.Д., Котенко А.Г., Сидоренко В.Г., Сотникова Е.А., Шапкина И.Н., Климанова В.С., Левина Д.Ю., Баранова Л.А., Давыдова Б.И., Уманского В.И., и ряда других исследователей в области организации движения поездов [4, 6, 30, 34, 44, 53, 54, 55, 57, 65, 78].

Существуют две укрупненные группы моделей, нацеленные на решение задач реализации точного (пунктуального) продвижения составов: детерминированные и стохастические. Обзор этих укрупненных групп представлен в трудах [76, 80]. Продемонстрировано – первая группа позволяет составлять график движения (ГДП) и осуществлять его рациональную корректировку в случае преобладания точно определенных факторов. При этом, во многих ситуациях эффективность планирования поездной ситуации возможно повысить, если реализовывать стохастическое моделирование с учетом данных, полученных на базе наблюдений, проведенных в предшествующие периоды.

Базовые методы детерминированного подхода анализа динамичной поездной ситуации в грузовом виде движения приведены в [34, 36, 59, 92]. Изучены пути достижения графиковых решений, нивелирующих опоздания, на основе создания дискретных моделей и использования технологий линейного программирования. Главным недочетом такого моделирования служит отсутствие учета влияния в прогнозных временных периодах случайных дестабилизирующих факторов, которые способствуют опозданиям.

Указанный минус в возможно компенсировать, используя стохастическое описание процесса пропуска грузовых поездов по участку. В одной из научных работ, решающих поставленную задачу, раскрыт оригинальный метод для поиска отклонений от траектории посредством свертки распределений исходных задержек (на входе участка) и возникающих в процессе движения задержек [60]. Модели прогнозирования задержек, возникающих в пути следования групп поездов по направлению с использованием математического подхода, изученные в [38, 72, 79], рассматривают итоговое время хода как суммарный набор случайных интервалов движения по фрагментам участка.

Для повышения устойчивости графика рядом исследователей применяются математические алгоритмы для описания процесса движения поездов. В работе [20] описаны методологические принципы управления движением потока грузовых поездов. В [19] изучено диспетчерское руководство движением поездов на направлении как один из базовых объектов в системе управления движением. Автором говорится о том, что группа поездов на диспетчерском участке представляет собой достаточно сложную систему, которая допускает описание разными математическими языками, в том числе при помощи дифференциальных уравнений. В работе отображена модель процесса организации движения, позволяющая находить запас надежности того или иного графика движения для исследуемого участка, обоснованно принимать рассогласования между исполненным движением и движением согласно нормативному графику. В [6] представлен подход, позволяющий определять запас устойчивости того или иного графика движения грузовых поездов для одного или группы участков, обоснованно предлагать потенциальное рассогласование между выполненными траекториями движением и траекториями, заданными сводным (нормативным) графиком.

В статье [16] Котенко А.Г. вместе с соавторами говорит о том, что «Разработка графика движения со строго нормированными условиями не позволяет учитывать опоздания, обусловленные несинхронностью движения, резким изменением технического состояния инфраструктуры и подвижного

состава, несоблюдением технологических нормативов стоянок на станциях, действием человеческого фактора и другими причинами». В своей работе автором предложен метод прокладки поездов на основе моделирования конфигураций графика для обеспечения его устойчивости, а также ввода компенсирующего интервала.

В статье [104] рассмотрены исследования в области разработки графика движения поездов и составления сводного (нормативного) расписания. Приводится детализация подходов к составлению долгосрочного графика (сводного). При этом график рассматривается с точки зрения устойчивого плана нормализации движения в случаях дестабилизации поездной обстановки и восстановлению движения поездов по долгосрочному графику. В статье приводится обзор 48 существующих и опубликованных подходов в период с 1973 г. по 2005 г. Приводится классификация и сравнение данных подходов, исходя из критериев надежности, устойчивости и стабильности выполнения перевозок. Особое внимание уделяется разработке расписания поездов при организации движения на однопутной линии, т.к. в этом случае отклонение от расписания одного поезда обязательно приведет к конфликту нахождения на перегоне других поездов, находящихся на поездном участке, и эти конфликты необходимо минимизировать на стадии составления долгосрочного плана. Соответственно, главная задача, поставленная в статье – определить основную методологию создания сводного графика движения грузовых поездов, снижающую влияние конфликтов нахождения двух поездов на одном участке инфраструктуры одновременно. (Данные конфликты возможны при следовании вслед идущего поезда со скоростью, выше впереди идущего, а также при следовании поездов противоположных направлений навстречу друг другу на однопутном участке). Рассмотрены методы разработки расписания на разветвленном участке и на линейном участке. В статье приводятся выводы о необходимости практического обоснования ряда подходов при помощи экспериментальной базы. Кроме того, приводится обоснование необходимости

программного расчета с последующей оценкой эксперта-разработчика графика движения поездов.

В статье [106] приведены результаты статистического анализа по экспериментальным данным межпоездных интервалов на двухпутной линии. Сбор данных осуществлялся на линии северной части Италии с помощью специальных датчиков. Произведено сравнение нескольких моделей распределений и их адекватность эмпирическим данным. Конечной целью статьи было сопоставление условий формирования траффика и межпоездных интервалов. Формирование межпоездных интервалов играет огромную роль в качестве пропуска поездов. Изучению данного элемента уделяется особое внимание в мировой практике. На протяжении нескольких лет проводилось изучение поведения машинистов поездов посредством прямых наблюдений и экспериментов при помощи специальных симуляторов. Усовершенствованные методы обработки данных позволяют прогнозировать поведенческие реакции машинистов в условиях возникновения межпоездных конфликтов для различных сценариев формирования поездопотока. Основная идея данной статьи – это применение математических инструментов для обработки информации по транспортному потоку в условиях возникновения сбоев в движении и отсутствии нарушений графика. Основным шагом описанного исследования явилось составление вероятностной функции плотности элемента в условиях двухпутной линии и проверка ее адекватности предложенной гипотезе.

Методика анализа включает три шага:

- прямое наблюдение, сбор данных об интервалах между поездами;
- группировка данных;
- оценка вероятностной функции плотности.

Проведена проверка адекватности функций распределения на основе семидесяти семи выборок по межпоездным интервалам. Проверены гамма-распределение, Эрланга, экспоненциальное, распределение Вейбулла и другие. Наиболее подходящей функцией распределения послужило распределение Вейбулла.

В статье [97] уделяется внимание изучению интервала как одного из основных элементов потока транспортных средств. С одной стороны, межпоездной интервал определяет временное и пространственное расстояние между поездами, следующими друг за другом. С другой стороны, данный элемент определяет плотность и поточность грузового трафика. Определение и изучение межпоездных интервалов в Индии в условиях неудовлетворительного состояния инфраструктуры и разнородности транспортных средств – достаточно сложная задача. В настоящей статье проводится статистический анализ межпоездных интервалов по данным пригородного движения на магистральной линии с интенсивным потоком. Анализ проводился как по трафику в целом, так и выборочно в зависимости от режима вождения. Полученные данные группировались по классам в зависимости от следования первого поезда и последующих поездов, и статистическая обработка проводилась отдельно для каждой выборки отдельно. В основе обработки данных лежит метод логарифмического правдоподобия. Определено, что больший интервал не приводит к межпоездным конфликтам. После проверки адекватности предложенных теорий, распределение Вейбулла оказалось наиболее подходящим для реальных данных. Тем не менее, полученные данные, распределение и его элементы ограничены конкретным участком сети.

В США также применяются методы математического моделирования для прогнозирования транспортных процессов. В [86] представлена методика моделирования времени следования транспортного средства (автомобильного) в зависимости от интенсивности транспортного потока. Представлена зависимость интенсивности выходящего потока от интенсивности входящего потока. Сделан вывод о том, что после перенасыщения участка, увеличение интенсивности входящего потока оказывает негативное влияние на работоспособность магистрали. Аналогичные выводы делает отечественный исследователь Левин Д.Ю. [38].

В публикации [101] представлен сценарный подход к изучению времени хода транспортного средства как случайной величины. Под сценариями авторами

подразумевается различные комбинации внутренних и внешних факторов, оказывающих влияние на транспортный поток. Моделирование динамики потока в разных условиях позволяет исключить перенасыщение и остановку потока. Также предложена усовершенствованная модель распределения трафика в плотном потоке. Поток делится на разные категории – свободный и плотный (в условиях очередей). В статье рассмотрена модель для плотного потока в условиях формирования очереди по традиционному принципу «первый пришел – первый ушел». В целом динамическая задача распределения поездопотока является основой для развития «умной транспортной системы». Модель распределения поездопотока по сети описывает, как распределяется трафик в пределах сети и, следовательно, определяет итоговое время на перевозку. Представленная модель основана на поведении поездопотока в реальных условиях. Практическая применимость модели заключается в поиске узких мест и точечных моментов развития сети в условиях увеличения трафика. Отличие от предыдущей модели заключается в рассмотрении разнородного поездопотока (соответственно предыдущая модель рассматривала однородный поток). В последствие изучены основные элементы работы городских перекрестков – интервалы между транспортными средствами, насыщенность потока машин и вместимость дороги. Данные элементы необходимы для определения продолжительности действия зеленого сигнала для того или иного направления. Особенность исследования заключается в нестандартном разделении дорожного полотна на секции (полосы). Данный подход позволяет ликвидировать погрешности, связанные со случайным распределением автотранспортных средств в пределах дороги. В отечественной науке математическая модель, описывающая автомобильный поток, описана в статье [67].

Во всей транспортной системе страны ключевое место занимает железнодорожный транспорт, направленный на перевозку массовых грузов, высокодоходных грузов и пассажиров. Зачастую, это единственный вид транспорта, связывающий отдельные населенные пункты страны. При этом, только на ведение поездов, компания-перевозчик расходует около 4 проц. от

общего объема производства электроэнергии в стране. Сводный (нормативный) график движения поездов, во многом, определяет объем энергопотребления через скоростные характеристики следования поездов, через предусмотренные интервалы, а также посредством формирования порядка отправления поездов с технических станций (присвоение исходной нумерации грузовым поездам). В статье [37] раскрывается зависимость энергетических потерь в контактной сети железнодорожного транспорта от вариантов взаимного расположения поездов различных характеристик и категорий в потоке с учетом системы тягового электроснабжения. Для анализа применены методы комбинаторики. В результате определены оптимальные варианты взаимного расположения поездов с наименьшими суммарными потерями электроэнергии.

Экономическая эффективность работы железнодорожного транспорта во многом определяется оптимизацией затрат, в том числе на энергетические ресурсы. Повышение эффективности и качества перевозочного процесса в целом требует совершенствования методики построения нормативного расписания. Поэтому задача построения энергоэффективного графика движения поездов для различных категорий с учетом характеристик тяговых подстанций является актуальной в современных условиях. В процессе движения поездов меняются их взаимное расположение на участках, ток и скорость поездов, так как каждый из них находится в каждый момент на определенном профиле пути, оказывающем свое сопротивление движению. Все это вызывает изменение нагрузок тяговых подстанций и влияет на величину потерь электроэнергии в контактной сети. Выбор варианта расположения поездов в потоке имеет большое значение и при построении энергоэффективного графика движения поездов необходимо осуществить поиск варианта расположения поездов с наименьшей удельной величиной потерь электроэнергии.

В статье проведены исследования по изучению зависимости потерь электроэнергии в контактной сети от вариантов расположения поездов, имеющих различные категории, в графике движения поездов с учетом характеристик действующих тяговых подстанций Приднепровской железной дороги (Украина).

Установлен вариант расположения поездов различных категорий с наименьшими затратами потерь в контактной сети: 1 – пассажирский, 2 грузовой массой 3000 тонн, грузовой массой 1400 тонн, грузовой массой 5000 тонн. Анализ зависимости потерь электроэнергии для различных значений межпоездных интервалов показал, что уменьшение интервалов между поездами приводит к увеличению потерь электроэнергии в контактной сети. Соответственно при необходимости повышения интенсивности трафика возникает влияние вариантов расположения поездов на итоговое значение потерь электроэнергии в контактной сети.

В статье [56] проведен и исследован анализ топливно-энергетической эффективности ОАО «РЖД», в том числе базового параметра в их структуре – локомотивного комплекса, который представляет собой основу обеспечения транспортного процесса и, в то же время, является одним из главных потребителей топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте. В статье представлены результаты изучения автоматизированной информационной системы «Энергоэффективность», представляющей собой неотъемлемую часть системы мероприятий, направленных на улучшение энергетической эффективности транспортной отрасли в процессе расчета и построения нормативного (сводного) графика движения.

В статье отображена архитектура продукта АИС «Энергоэффективность», нацеленного на интеллектуальное решение проблемы улучшения энергоэффективности на транспорте (железнодорожном). Этот программный продукт предназначен для автоматизации следующих процессов:

- разработка и согласование планов организационно-технических системных мер для филиалов ОАО «РЖД», а также для региональных структурных подразделений;
- группировка планов для автоматизированной разработки сводного плана для энергосбережения и улучшения энергетической эффективности компании-перевозчика;
- отслеживание контрольных точек реализации и эффективности осуществления мероприятий по достижению заданных показателей;

– определение баланса между плановыми и реальными затратами на реализацию комплекса мер, размерами экономии по каждой категории ресурсов в натуральном, условном и финансовом эквиваленте;

– суммирование результатов осуществления мероприятий, направленных на снижение эксплуатационных затрат, на дорожном уровне ОАО «РЖД».

В публикации [25] рассматривается один из способов повышения энергоэффективности на железнодорожном транспорте. Автором проанализированы результаты эксперимента на участке железной дороги и установлено, что энергия рекуперации позволяет значительно снизить удельный расход по всем сериям электровозов.

Согласно программе правительства РФ, целью долгосрочной государственной энергетической политики России является максимально эффективное использование природных ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышение качества жизни населения и выполнение обязательств перед зарубежными партнерами. Проведенными аналитическими исследованиями обнаружен резерв – 35 проц. всей потребляемой в стране энергии теряется (расходуется нерационально). В статье особый акцент сделан на энергопотребление со стороны отрасли железнодорожного транспорта. В настоящее время этот вид транспорта находится на позиции крупнейшего потребителя топливных ресурсов в государстве. Приблизительно 3 проц. всей сгенерированной в Российской Федерации электроэнергии расходуется подразделениями компании ОАО «РЖД». С целью совершенствования энергетической результативности деятельности дирекций и служб, входящих в состав компании ОАО «РЖД», во всех направлениях и, главным образом, в сегменте железнодорожного транспорта принята Энергетическая стратегия ОАО «РЖД». Базовые задачи данной стратегии:

– совершенствование параметров энергетической результативности во всех ведущих векторах операционной деятельности (движение поездов, инфраструктурный комплекс, ремонтный комплекс, производство);

– увеличение уровня рекуперлируемой (возвращаемой) энергии и совершенствование результативности ее применения, оборудование подстанций специализированными устройствами (инверторами, накопителями энергии, образующейся при рекуперативном торможении в местах наиболее интенсивного применения рекуперации);

– снижение уровня негативного влияния непосредственно энергетики железнодорожного транспорта на экологию.

Действенным механизмом повышения эффективности потребления энергоресурсов является развитие системы рекуперативного торможения. Различные серии электровозов обладают разными характеристиками, в том числе и в отношении рекуперации. В статье приводятся результаты исследований участка Транссибирской магистрали Тайга – Мариинск по сокращению удельного расхода электроэнергии на тягу поездов.

В статье [7] представлена технология нормирования процесса отправления поездов с начальных станций, исходя из их массы поездов и возможных расходов, связанных с остановками грузовых составов на станциях. Подчеркнуто два вектора, направленных на существенное снижение текущих расходов от стоянок составов грузовых поездов на железнодорожных станциях участка. Найдены и сгруппированы фундаментальные эксплуатационные показатели, оказывающих влияние на энергетические потери при остановках поездов. Выдвинута методика определения оптимального по критерию энергоэффективности плана отправления грузовых поездов. Предложенная технология организации движения поездов на основе эффективности энергопотребления позволяет сократить до 20 проц. расходов, связанных со стоянками поездов.

Предложен метод организации движения поездов по принципу энергоэффективного построения и использования ниток графика вместо существующего принципа обезличенного формирования ниток графика по принципу очередности. Автором статьи решается оптимизационная задача организации поездопотока путем рационального распределения поездов между нитками нормативного графика движения. Критерием оптимальности служит

снижение эксплуатационных расходов, связанных с необоснованным простоем поездов на промежуточных станциях, разгоном и замедлением.

Отмечено, что задача требует большого объема оперативных расчетов, в связи с чем разработана определенная логическая цепочка пошаговых действий.

Достижение данной цели реализуется в два этапа:

1. Исключение отправления составов грузовых поездов на те нитки графика, которые предусматривают плановую стоянку на поездоучастке.

2. Организовывать отправление грузовых поездов на нитки в зависимости от массы поезда, обеспечивая рациональный алгоритм энергопотребления, – на нитки, в которых заложены стоянки планировать поезда с меньшей массой.

В статье представлена методика построения очередности отправления грузовых поездов с начальных пунктов участка, исходя из массы каждого состава. Методика показала свою эффективность на практике. На примере грузонапряженного направления, включающего три технические станции, осуществлен расчет экономического результата от применения представленной технологии. Используя принципы планирования отправления грузовых поездов по критерию массы, произведен расчет и последующее определение целесообразности снятия экономически неэффективных ниток на предстоящие расчетные сутки. Следующим шагом реализовано перераспределение поездов между предложенными нитками, согласно технологии, с учетом их массы. Реализовано сравнение операционных расходов при остановках на станциях диспетчерского участка на основании графика исполненного движения поездов и варианта, сформированного с применением разработанной технологии. В результате достигнуто снижение эксплуатационных расходов от остановок поездов на станциях диспетчерского участка на 20 проц.

В общемировой практике допускаемые нарушения графика движения поездов являются серьезной проблемой в повседневной деятельности железнодорожного транспорта. Внимание к качеству и эффективности предоставляемых услуг транспортной отрасли и надежности выполнения сроков доставки усиливается как со стороны организаторов перевозочного процесса, так

и со стороны пользователей железнодорожных сервисов. Для услуг, предоставляемых железнодорожным транспортом, надежность можно определить как неотъемлемый элемент современного сервиса. Рассматривая сегмент грузовых перевозок с точки зрения пользователей транспортных услуг, надежность можно разделить на две очень близкие составляющие: регулярность и пунктуальность. Регулярность – это целевой элемент, позволяющий оценить перевозочную способность, при этом пунктуальность является более детальным измерителем, оценивающим отклонения поездов от своего расписания по прибытию и отправлению на станции от запланированного времени.

Недопустимо отправление поезда ранее времени, заложенного в графике, поэтому возникает высокий риск отправления поездов с опозданием. При этом, отправление со следующей станции зачастую происходит позже графического времени. Таким образом, существует два варианта отправления поездов – по расписанию или с опозданием. Если графическое время отправления заложено в небольшом временном интервале (действующий в ОАО «РЖД» интервал +5/-10 мин.), то отправление поезда по расписанию является достаточно сложной задачей.

В существующей литературе [64] авторами описаны методы определения элементов графика: времени хода и расчетных межпоездных интервалов, используемые на сети дорог России. Основные элементы графика рассчитываются посредством тяговых расчетов. Полученные данные уточняются при помощи управления поездов машинистами-инструкторами, а также на основании данных опытных поездок со специализированным динамометрическим вагоном.

Время хода грузового поезда по перегону рассчитывается в двух вариантах: при организации безостановочного следования поезда через ограничивающие перегон отдельные пункты (чистое время хода), а также при наличии остановок грузового поезда на данных отдельных пунктах. Для того, чтобы рассчитать добавочное время, необходимого для разгона и замедления, необходимо знать алгебраическую разность времени хода состава поезда по перегону с остановками

и чистого времени хода. При стандартных расчетах (тяговых) движение поезда представляет собой движение условной материальной точки. Масса поезда в этом случае концентрируется в середине состава. Время хода поезда по перегону определяется по моментам времени сопоставления середины поезда с осями станций, ограничивающих перегон. Соответственно, элемент перегонного времени хода – это время между моментами проследования центром тяжести поезда расчетных осей промежуточных станций (раздельных пунктов).

При определении межпоездных интервалов пакетного движения, поезда разграничиваются тремя последовательно расположенными блок-участками (при трехзначной автоблокировке). Подразумевается, что вслед идущий поезд постоянно движется на зеленый сигнал, вследствие чего скорость его не снижается, состав поезда не замедляется. Межпоездной интервал по этому алгоритму определяется формулой:

$$I=0,06*L_p/V_x=0,06*(l'_{\text{бл}}+ l''_{\text{бл}}+ l'''_{\text{бл}}+ l_n) \quad (1)$$

где $l'_{\text{бл}}$, $l''_{\text{бл}}$, $l'''_{\text{бл}}$ – длины непосредственно первого, второго и третьего блок-участков, м;

l_n – протяженность поезда, м;

V_x – средняя скорость хода на рассматриваемой фрагменте перегона, км/ч;

0,06 – коэффициент, служащий для конвертации скорости из км/ч в м/мин;

L_p – расчетная длина, м.

В случае, если на направлении курсируют скоростные пассажирские поезда, имеющие увеличенный тормозной путь, превышающий безопасное минимальное расстояние между попутными сигнальными точками, автоблокировка должна быть четырехзначной. На участке допускается оставить и трехзначную автоблокировку, при этом обязательно требуется дополнить ее устройством автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН), что фактически обеспечивает своевременное уведомление машиниста о состоянии трех впереди лежащих блок-участков. Для обеспечения безопасного для рассматриваемой

линии интервала пакетного следования существует потребность в рациональной расстановке светофоров на перегонах.

В [30] приводится обоснование построения параллельного графика как наиболее эффективного с точки зрения пропускной способности участков, оборудованных автоблокировкой. На двухпутных линиях пропускную способность перегонов определяют отдельно по каждому направлению движения (нечетному и четному). Время занятия перегона относят на один поезд, пропускаемый по каждому из главных путей. Это время определяется величиной расчетного межпоездного интервала $T=I$. Таким образом, максимальная пропускная способность двухпутного участка, оборудованного автоблокировкой, при параллельном графике движения определится линейной формулой

$$N=1440/I \quad (2)$$

где T – период графика, мин;

I – расчетный межпоездной интервал, мин;

Данная формула ведет к простому выводу – уменьшение межпоездного интервала является наиболее эффективным способом увеличения пропускной способности. При этом, отдельно взятый поезд с разной осевой нагрузкой имеет различные характеристики динамики следования [51], а увеличение плотности потока поездов ведет к росту числа поездов, следующих на желтый и красный огни светофоров, что, в свою очередь, вызывает уменьшение ходовой скорости и увеличение времени задержки поездов на перегонах. Практика и теоретические исследования [16, 38, 84] подтверждают вывод о том, что межпоездной интервал не может быть уменьшен до бесконечно малой величины, даже при соблюдении условий безопасности посредством современных технологических решений (виртуальное сцепление грузовых поездов, бессветофорная автоблокировка с подвижными блок-участками и системой АЛС-ЕН и другие) – при уменьшении данного элемента возникает конфликт между фактической и теоретической пропускной способностью. Причинами возникновения разрыва между расчетными и реальными пропускными возможностями является использование

постоянных величин в формулах определения пропускной способности и отсутствие характеристик потока поездов. Кроме того, российскими учеными изучены внешние и внутренние факторы, влияющие на соблюдение расписания, в числе которых инфраструктурные ограничения, неисправности тягового подвижного состава, квалификация локомотивных бригад, недостатки плана формирования и графика движения, нарушения технологической дисциплины. В [66] представлена модульная структура интегрированной технологии организации движения поездов грузового вида по расписанию. Представлены требования к разработке нормативного (сводного) графика движения. Представлена комплексная программа поэтапного перехода на графиковое следование поездов грузового вида.

Сокращение межпоездного интервала, в том числе посредством интервального регулирования движения поездов, условно решает задачу участков, не решая задачи узлов и станций. Этот факт говорит о том, что увеличение входящего на участок поездопотока, без комплексного подхода, непременно ведет к перенасыщению участка и, как следствие, сокращению потока на выходе. Другими словами, происходит завышение норматива рабочего времени локомотивных бригад, нарушение установленного расписания грузовых поездов и «бросание» поездов на подходах к станциям погрузки/выгрузки как вынужденная мера диспетчерской регулировки поездообразования. Как следствие, создается серьезный барьер в пропуске поездопотока, выраженный в превышении норматива рабочего парка грузовых вагонов дороги [52].

Устойчивость сводного (нормативного) графика движения поездов достижима при наличии небольших сбоях в движении поездов – нескольких минут. Объективно, ни один график движения не обеспечивает достаточную надежность при значительных сбоях в эксплуатационной обстановке. Нарушения графика движения приводят к задержкам поездов, по крайней мере, в условиях насыщенного графика, что требует, в свою очередь, адаптивной подстройки графика в режиме реального времени. Это вызывает определенные трудности по причине ограниченности алгоритмов диспетчерского управления, что делает

калибровку моделей еще более затруднительным. Если нормативный график на стадии разработки предусматривает дополнительное время нахождения груза в движении, то надежность значительно повышается и риск невыполнения договорных обязательств по перевозке снижается. Запланированное время, которое в некоторой степени превышает требуемое время, гораздо лучше, чем незапланированные задержки поездов. Учитывая данный фактор, можно оценить рациональное время нахождения поездов в движении.

В [81] описан подход по определению компромисса между соблюдением точности прибытия и выполнением задач по обеспечению необходимого уровня перевозок. В статье представлена зависимость между объемом реализованной услуги (объемом перевозок) и межпоездным интервалом:

$$Cap_{train} = Cap_{serv} / H_{plan} \quad (3)$$

где Cap_{serv} – реализуемый объем перевозок, Cap_{train} – вместимость отдельно взятого поезда, H_{plan} – межпоездной интервал.

Из формулы (3) видно, что освоить плановый объем перевозок возможно двумя способами:

- 1) повысить качество использования каждой используемой нитки графика;
- 2) сократить межпоездной интервал.

1.2.2 Состояние исследований в области построения вариантных (оперативных) графиков

Кроме решения задач формирования элементов графика на стадии долгосрочного планирования, исследователями проблем транспорта в настоящее время широко обсуждается задача повышения эффективности краткосрочного, оперативного управления движением поездов [82]. основополагающим фактором повышения качества перевозки и улучшения экономических показателей является динамическая подстройка графика движения с учетом данных о реальной обстановке. Быстрый рост объема грузовых перевозок на Российских дорогах в 70-х годах прошлого столетия привел к исчерпанию пропускной способности магистральных линий. Это вызвало всплеск интереса к проблеме адаптивного управления. Одним из первых Климанов В.С. [31] подверг детальному рассмотрению круг задач в области оперативной корректировки графика грузового движения. Проблему оптимизации движения поездов путем реализации гибкого диспетчерского управления в России также исследовали ученые [18, 28, 38, 39, 40, 63, 65]. Исследования в указанном направлении проводились также в ряде стран Европы (см., например, обзор [79]). Однако конкретной реализации механизмов тонкой подстройки движения на участке к меняющимся условиям в указанных работах предложено не было. Из исследований последнего времени следует отметить работы [41, 61, 83, 85, 90]. Показательный пример использования оперативного управления в режиме реального времени приведен в работе [62], в которой решается задача автоматизированной корректировки графика непосредственно перед началом технологического «окна» по ремонту инфраструктуры.

Корректировка грузового движения с учетом экономического результата эффективна при наличии интеллектуальной программы поддержки принятия решений, способной моделировать ситуации и выбирать оптимальный вариант регулировки [94]. В работе [96] лишь высказывается идея оценивания результатов мероприятий по улучшению пропуска грузовых поездов на основе анализа

эксплуатационных затрат. Имеется ряд публикаций (например, [23]), в которых показывается определяющая роль расходов по оплате энергии (топлива) в формировании переменной части эксплуатационных затрат. В предшествующих исследованиях по разработке модели построения вариантного графика движения существуют пробелы, которые касаются закономерностей движения грузовых поездов по главным железнодорожным линиям, а также критериев поиска оптимальных диспетчерских решений.

В сложных, разветвленных системах железнодорожного транспорта даже незначительное влияние на один элемент может привести к более масштабным последствиям на всей сети. Для выполнения задач планирования, прогнозирования и оперативного управления не возникает сомнений в необходимости компьютерной поддержки при выполнении ряда задач, связанных с долгосрочным и оперативным управлением. Особое значение имеет программная поддержка при разработке требуемого графика движения для всей магистрали, учитывая особенности отдельно взятых участков. Для этих целей разработана программа SIMU-PLAN на базе предыдущей версии SIMU-VII. Программный продукт разработан Институтом транспорта, железнодорожного строительства и управления университета Hannover (Германия).

Данный программный продукт позволяет решать ряд производственных задач, среди которых особое место занимают:

- повышение пропускной способности посредством использования современных систем безопасности;
- повышение эффективности использования инфраструктуры транспорта, рациональное использование производственных мощностей.

SIMU-PLAN позволяет в автоматическом режиме разрабатывать график движения поездов с учетом возможного увеличения грузопотока, а также с учетом влияния технологических «окон» для ремонта инфраструктуры. Данный программный продукт особенно проявляется при разработке расписаний для дальних маршрутов. В оперативном режиме программа учитывает возможные конфликты в расписании, указывает на них и дает возможные варианты

устранения выявленных конфликтов. Дополнительно, SIMU-PLAN позволяет анализировать качество построения графика путем симулирования разработанного расписания. Вышеописанные качества программы говорят о высоком практическом интересе данного продукта для наиболее эффективной организации движения перевозок, как на начальном этапе планирования, так и в процессе оперативного контроля.

В статье [87] предложен специальный подход к формированию и представлению информации о расписании пассажирских и пригородных поездов. Актуальная информация о расписании во многом определяет маршрут передвижения каждого отдельно взятого пассажира. Соответственно, представление полной информации о задержках изначально выбранных маршрутов позволит своевременно определить альтернативный маршрут. В статье представлен полиномиальный алгоритм формирования информации о задержках и представлена информация об оценке работы данного алгоритма на сети немецких железных дорог в условиях симуляции различных сценариев задержек поездов.

Основным критерием выбора маршрута до пункта назначения является время в пути. Однако, существуют и другие критерии, такие как цена поездки, количество пересадок. Также надежность маршрута имеет значение. Целью исследования является создание алгоритма своевременного обновления информации о задержках поездов для оптимального выбора маршрута следования в условиях нарушения графика движения поездов.

Работа [74] посвящена постановке и решению задачи оптимального управления движением поезда (ОУДП) с точки зрения современной теории и практики автоматического управления. Эта проблема до настоящего момента является актуальной, однако к до сих пор окончательно не решена, что обусловлено большим числом случайных факторов, оказывающих непосредственное влияние на характер и траекторию движения поезда, а также совершенствованием в последнее время скоростного и высокоскоростного, а также спаренного, объединенного, тяжеловесного и длинносоставного движения.

Обоснована математическая модель движения поезда и формализация задачи ОУДП, представлена классификация известных методов её решения. Предложена имитационная модель в среде Matlab/Simulink, позволяющая исследовать различные модели и законы управления. Представлен метаэвристический алгоритм совершенствования режимов управления поездом, который использует непосредственно имитационную модель, сформулированный в виде программного модуля на языке Matlab. Приведены выводы по вычислительным экспериментам, подтверждающих сходимость алгоритма.

В ходе проведенных исследований авторами сформулированы следующие основные итоги:

1. Эффективным способом решения задачи оптимизации режимов ведения поезда является осуществление вычислительных экспериментов посредством имитационного моделирования. Представленная при помощи инструментов для моделирования сложных динамических комплексов среды MATLAB/Simulink имитационная модель следования поезда, её математическое, алгоритмическое и программное сопровождение могут быть использованы для изучения различных закономерностей в области управления движением поезда и алгоритмов оптимизации режимов автоведения.

2. Представленный метаэвристический алгоритм оптимизации режимов управления поездом, использующий положения стохастической оптимизации, а также его программное описание на языке MATLAB, имеют хорошие показатели сходимости. Алгоритм представляет возможность решать задачу оптимизации режимов управления поездом для заданных исходных данных о фрагменте пути (профиль пути, ограничения скорости и др.), единице подвижного состава (вес, длина и составность поезда) и расписании следования.

1.2.3 Состояние исследований в области организации жестко- и виртуально-сцепленных поездов

Эффективность технологий сдвоенного пропуска грузовых поездов по участкам магистральных железных дорог исследуется в ряде работ. Показывается, что использование жестко-сцепленных поездов позволяет повысить пропускную, провозную способность участков на 10-20 проц., получить значительный экономический эффект от соблюдения нормативных сроков доставки [58]. Особенно эффективна технология в периоды проведения продолжительных «окон» [57]. В статье [32] автором предложена методика оценки эффективности формирования и пропуска жестко-сцепленных поездов на участках и полигонах дорог на основе сравнения экономических эффектов различных сценариев организации поездопотока: формирования, пропуска грузовых поездов графической массы или соединенных поездов. В результате определяется экономический эффект от использования технологии физического соединения, делается вывод о преимуществах данной технологии.

В статье [42] оценивается степень повышения эффективности использования пропускной способности участка посредством снижения межпоездного интервала при вождении ВСЦ поездов. Путем моделирования получен вывод о том, что использование технологии «виртуальной сцепки» на участке Мариинск – Красноярск-Восточный позволяет увеличить пропускную способность на 19 проц. относительно существующего графика. В работе [33] представлены результаты исследований эффективности применения бессветофорной системы регулирования движения поездов, в том числе, с использованием технологии ВСЦ.

В статье [14] исследуется режим разграничения между поездами с позиции обеспечения безопасности движения. Предложена методика определения достаточного интервала с использованием инструментов математического моделирования. Сделан вывод о том, что при существующей системе автоблокировки имеются резервы, использование которых позволяет сократить

интервал. Исследование показывает, что при технологии ВСЦ в большинстве случаев можно сближать поезда на расстояние, меньшее 1500 м. При определении номинального интервала сближения, кроме длины тормозного пути, учитываются готовность инфраструктуры и перерабатывающие возможности станций участка. Подобный вывод делается и в работе [13], в которой описан комплексный подход к определению эффективности вождения ВСЦ поездов. Авторами поддерживается мнение о том, что виртуальная сцепка – это только часть комплекса мер по повышению эксплуатационных возможностей сети дорог. Эта технология позволяет получить эффект при реализации ряда дополнительных решений, таких как сокращение продолжительности станционных операций и повышение надежности инфраструктуры.

В ряде исследований (например, в [38, 85, 89]) доказывается, что линейный рост коэффициента использования пропускной способности наблюдается лишь при малой плотности потока поездов. В зоне повышенной плотности (при интервалах менее 10 мин.) рост показателя пропуска затормаживается и, в дальнейшем, полностью прекращается. Причиной служит влияние случайных факторов, отклоняющих траектории движения поездов от нормативных. Вероятностное моделирование показывает, что результатом случайных влияний оказывается возникновение двух неграфиковых задержек на 300 км. пути при среднем интервале пакетного пропуска, равном 12 мин. [22]. Этот эффект препятствует достижению высокой эффективности технологии ВСЦ на реальных железных дорогах.

В статьях [46, 47] рассматривается вопрос повышения энергетической эффективности процесса тяги при пропуске поездов в режиме ВСЦ. Исследуются характеристики потребления энергии электровозами типа ЗЭС5К в режиме «виртуальная сцепка»; делается вывод о возможности снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов на 5 проц. Однако существуют ограничения, накладываемые системой электроснабжения на пропуск плотного потока. Так, при пакетном движении тяжелых грузовых поездов с интервалом

8 мин. влияние потерь в тяговой сети ведет к понижению напряжения в сети на величину около 1 кВт. [21].

В статье [10] представлена модель повышения эффективности организации движения грузовых поездов за счет реализации координатных принципов интервального регулирования. Учет взаимозависимости сил сопротивления движению и скорости движения грузового состава, нелинейности изменения тяговых параметров, дискретности управления контроллером машиниста в процессе разгона и следования, и других факторов приводит к необходимости описания движения поезда в виде интегрально-дифференциальных уравнений. Для решения непосредственной задачи описания процесса следования поезда при координатном способе регулирования интервалов ключевым образом использована непрерывная математическая модель.

1.3 Сценарии формирования графика движения поездов

Существующий конфликт между описанными выше подходами (детерминированным и стохастическим) к построению графиков движения поездов и его элементов обусловлен влиянием множества факторов на организацию движения поездов. Нельзя выделить универсальную модель, описывающую эксплуатационный процесс, поэтому ни один из графиков не будет нести в себе абсолютную надежность. При этом, указанное множество факторов можно сгруппировать в укрупненные подмножества (сценарии). Сценарные подходы к изучению точности выполнения расписания и времени нахождения транспортного средства (поезда, автомобиля) на участке применяются в ряде работ [53, 71, 101]. К таким сценариям можно отнести реализацию графика в дневное и ночное время суток, зимнее и летнее время года, с учетом влияния технологических «окон», с учетом влияния дневных предупреждений об ограничении скорости, с учетом влияния отказов технических средств и технологических нарушений. Следует отметить, что в большинстве случаев наблюдается комбинация укрупненных сценариев. Для понимания области применения результатов исследования, возможные сценарии формирования графика сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Сценарии формирования графика движения поездов

Сценарий	Время года		Время суток		«Окно» по ремонту инфраструктуры		Неисправность технического средства		Дневные предупреждения	
	зима	лето	день	ночь	есть	нет	есть	нет	есть	Нет
1	+		+		+		+		+	
2		+		+		+		+		+
3	+			+	+			+	+	
4	+		+			+		+	+	

При этом, в таблице 3 раскрыты только некоторые возможные сценарии развития эксплуатационной обстановки (даже опыт, возраст, темперамент и квалификация непосредственных работников, обеспечивающих перевозочный

процесс, оказывает непосредственное влияние на выполнение элементов графика движения). Таким образом, фокусируясь на различных сценариях, формируются разные задачи планирования и нормирования элементов графика.

Например, в процессе долгосрочного планирования невозможно спрогнозировать влияние отказов технических средств и, если взять статистику по отказам и технологическим нарушениям, заложить их влияние на выполнение графика движение, то велика вероятность разработки необоснованно завышенных элементов графика. Тем не менее, такой подход послужит обоснованием для построения вариантного (оперативного) графика в случае возникновения непланового сбоя.

В то же время, влияние циклических воздействий, таких как времена года и времена суток возможно заложить в ходе разработки долгосрочного графика движения – сводного (нормативного). Ниже приведены результаты расчетов для участка главной магистрали Дальневосточной железной дороги по выполнению времени хода грузовых поездов по сценариям: «зима-день», «зима-ночь», «лето-день» и «лето-ночь». Следует отметить, что элементы графика в каждом сценарии будут отличаться, но подходы и методы, описанные в диссертации – универсальны.

1.4 Постановка задач исследования

Для магистральных конвенциональных железных дорог России, Китая и других стран, на которых имеется преимущественно грузовое движение, точность доставки грузов является одним из ключевых элементов качества обслуживания пользователей. Зная точное время прибытия, клиент выстраивает схему мультимодальной логистики: планирует использование терминально-складских, людских и других ресурсов, планируя транспортные издержки. Точность выполнения расписания, во многом, определяет ценность бренда в транспортной отрасли и является конкурентным преимуществом для любой компании-перевозчика.

Рядом железнодорожных компаний мира в настоящее время осуществляется продажа ниток графика; компания-оператор получает гарантию того, что перевозка будет реализована по расписанию, соответствующему данной нитке. В этих условиях построению графика движения уделяется особое внимание. Для перевозчика это означает, что существует риск экономической потери (штрафных санкций) при доставке груза с опозданием. Возникают также потери и при ранней доставке груза в пункт назначения из-за излишнего простоя поезда на путях станции или занятия складских мощностей. Все указанное требует так построить график движения, чтобы избежать дополнительных расходов и потерь.

На первый взгляд, задача построения выполнимого графика движения не представляет серьезного интереса – можно разграничить поток путем ввода таких межпоездных интервалов, которые позволят машинистам вести поезда в комфортных условиях в режиме с «зеленого» на «зеленый»; кроме того, можно изначально заложить в норматив времени хода резервы нагона, которые позволят беспрепятственно ввести поезд в график в случае возникновения сбоя в движении. Достаточные временные резервы, а также большие межпоездные интервалы, безусловно, приведут к построению устойчивого графика движения, имеющий наименьший период восстановления. Такой график движения будет иметь минимальные потери от потенциальных инцидентов, влияющих на

перевозочный процесс. С другой стороны, количество поездов, закладываемых в график движения, будет снижаться пропорционально увеличению межпоездных интервалов, что недопустимо в условиях роста перевозок. Экономическая эффективность требует обоснованного нахождения компромисса между временными и количественными характеристиками нормативного графика движения поездов.

В конечном итоге, целью работы является поиск путей повышения экономической эффективности в сегменте грузового движения при организации перевозок на грузонапряженных двухпутных линиях посредством корректировки нормативов графика движения, использования технологий спаренного пропуска поездов, а также исключения предъявления пени за нарушение заданных сроков доставки.

Указанная цель предопределила постановку следующих основных задач диссертационной работы:

— проведение анализа существующих отечественных и зарубежных научных работ, связанных с разработкой графика движения поездов, использованием методов интервального регулирования, а также повышением энергоэффективности перевозочного процесса;

— исследование влияния интенсивности грузового потока на показатель точности соблюдения графика при реализации режимов одиночного следования, движения жестко-сцепленных и виртуально-сцепленных грузовых поездов (ВСЦ);

— проведение анализа энергопотребления при использовании различных режимов управления грузовыми поездами по участку, в том числе, при режимах спаренного пропуска;

— разработка и обоснование методики формирования перегонных, участковых времен хода с учетом реальной ситуации посредством вероятностного подхода;

— оценка влияния межпоездных интервалов по отправлению с технической станции на время хода грузовых поездов по направлению, в том числе, с применением технологии виртуального сцепления поездов;

– оценка эффективности, предложение условий реализации спаренного пропуска грузовых поездов по линии с высоким заполнением пропускной способности;

– разработка показателя и методики оценки экономической эффективности графика исполненного движения грузовых поездов с учетом соблюдения нормативных сроков доставки.

Таким образом, диссертационное исследование направлено на совершенствование эффективности процесса перевозок посредством использования экономически эффективного графика движения поездов, обоснования способов, вариантов и условий спаренного пропуска грузовых поездов, а также повышения уровня надежности выполнения сроков доставки. Корректировка элементов графика производится на основе статистической обработки массивов данных о реальном движении поездов.

Результаты по первой главе

1. Несмотря на повышение уровня информатизации в сфере планирования и организации движения, роль диспетчерского управления остается ключевой. Выполнение установленных сроков доставки, точность доставки грузов и пассажиров, минимизация энергетических потерь – все эти элементы находятся в зоне ответственности диспетчерских центров. Кроме того, диспетчерские регулировки нивелируют сбои, возникающие на инфраструктуре и подвижном составе, и от качества регулировочных оперативных решений зависит скорость восстановления нормальной работы отрасли. Это позволяет утверждать, что современный транспортный поток не поддается стратегическому прогнозированию с использованием действующих методов. Существующие методики построения графика движения поездов в недостаточной степени используют информацию о работе участка дороги в предшествующие периоды времени. Кроме того, при оперативном планировании поездной работы слабо учитываются несинхронность движения поездов, изменения состояния инфраструктуры, вероятностные характеристики потока поездов и другие факторы. Оперативное планирование остается в руках поездного диспетчера, а реализация перегонных времен хода зависит от профессионализма локомотивной бригады.

2. Указанные доводы побуждают к поиску методов обоснования корректировки элементов графика, которые позволят повысить точность и эффективность грузовых перевозок. Задача локальной подстройки перегонных времен хода является вполне реализуемой, так как в норматив времени нахождения груза (порожних вагонов, предъявленных к перевозке) в пути следования закладываются достаточно большие резервы времени, предусмотренные договорными обязательствами на осуществление перевозки. Задача увеличения межпоездных интервалов, с одной стороны, предполагает снижение количества закладываемых ниток, с другой стороны, ведет к повышению устойчивости графика движения. Снижение количества ниток

графика движения в текущих условиях работы дорог России (в особенности Восточного Полигона), допустима только при условии увеличения массы и составности каждого поезда. Эта задача реализуется посредством гибкого применения технологий сдваивания грузовых поездов, в том числе при помощи виртуального соединения, объединения контейнерных поездов и максимальной загрузки локомотивов, имеющих возможность перевозить поезда массой до 7100 тонн.

3. Повышение устойчивости графика движения и точности грузовых перевозок является сложной комплексной задачей, включающей в себя не только развитие методов математического моделирования перевозочного процесса, но и усиление пути, тяговых подстанций, устройств контактной сети, локомотивного комплекса. Кроме того, в условиях применения современных методов интервального регулирования, в том числе посредством организации виртуально-сцепленных поездов, предполагается изменение технологических процессов на станциях, сокращение операций обработки составов и повышение надежности технических средств и подвижного состава. Соответственно, современные изменения в организации движения поездов требуют новых подходов к разработке графика движения поездов, а также гибкого применения действующих технологий спаренного пропуска грузовых поездов.

2 МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕГОННЫХ ВРЕМЕН ХОДА НА ГРУЗОНАПРЯЖЕННОМ НАПРАВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

2.1 Вероятностный подход к определению элементов графика движения поездов

На сегодняшний день времена хода по участкам определяются на основе тяговых расчетов с учетом добавок времени, предназначенных для компенсации отклонений в движении поездов [48]. Основные элементы графика движения устанавливаются, исходя из характеристик обращающихся локомотивов, вагонов, состояния инфраструктуры и системы интервального регулирования. Существующая методика определения элементов графика имеет существенный минус, заключающийся в том, что назначение добавок времени производится без должного обоснования, на основе квалификации и опыта инженера-графиста. Результатами служат низкий уровень выполнения расписания грузовых поездов и экономические потери компании-перевозчика.

В [16] коллективом авторов предложена альтернативная методика формирования графика движения поездов на базе моделирования конфигурации графика и ввода компенсирующего интервала. Исследователями подтверждается, что один из ключевых факторов, влияющих на снижение надежности соблюдения расписания – это несинхронность движения, представляющая собой непрерывное изменение межпоездного интервала в процессе движения. Уменьшение интервала между поездами ведет к увеличению влияния несинхронности на траектории движения поездов. Для ликвидации несинхронности авторами предлагается ввести увеличенные интервалы после прохода пакета из некоторого числа поездов, которое определяется для каждого случая отдельно. Методика формирования компенсирующего интервала активно используется в реальной эксплуатационной обстановке для снижения плотности потока в случаях перенасыщения диспетчерских участков. При этом, на грузонапряженных направлениях возникает риск остановки участка, предшествующему станции организации

компенсирующего интервала, нарушения расписания пассажирских и пригородных поездов, непроизводительных потерь, связанных со сменами локомотивных бригад на промежуточных станциях участка, а также ввода ограничений поступления грузовых поездов по междорожным стыковым станциям.

Для создания устойчивого графика движения необходимо иметь методику корректировки элементов графика, которая позволяет обоснованно вводить добавки времени с учетом реальной обстановки на участке диспетчерского управления без ограничений по отправлению с технической станции. Точность выполнения расписания в грузовом сегменте зависит, решающим образом, от интенсивности потока грузовых поездов. При этом, на параметры и элементы рассеяния моментов прибытия влияют действующее состояние пути, контактной сети, время суток, погодные условия, опыт и квалификация локомотивных бригад и другие факторы. Соответственно, в фундамент эффективного способа расчета элементов сводного (нормативного) графика для поездов грузового сегмента перевозок кладется вероятностная модель движения. Реализация этой технологии учитывает статистические параметры движения поездов и технологических операций работы узлов, полученных на основе анализа реальных данных. Результатом применения модели является предопределение параметров отклонений от расписания при данном сценарии эксплуатационной ситуации на направлении. Далее, вводятся основные элементы графика – интервалы пакетного отправления с технических станций и времена хода по участкам. Сводный график движения по магистрали формируется путем стыковки сегментов, построенных для всех участков железнодорожного направления.

При разработке эффективного графика движения грузовых поездов необходимо использовать элементы движения, максимально учитывающие реальную ситуацию. Причинами низкого уровня выполнения графика являются случайные влияния: кратковременные ограничения на инфраструктуре, технические отказы, а также наличие человеческого фактора. Реакция на возникающие отклонения у различных машинистов неоднозначна, она зависит от

квалификации, опыта и личностных характеристик специалиста. Чтобы повысить качество выполнения графика, целесообразно использовать информацию о реальном движении поездов, которая содержится в исторических данных. Эта информация кладется в основу стохастической модели, которая используется при определении перегонных времен хода грузовых поездов.

Основным положением вероятностного подхода к вопросу корректировки времен хода и межпоездных интервалов является использование статистических параметров времен выполнения технологических операций, полученных при различных типовых сценариях эксплуатации участка железной дороги. Можно вычленить укрупненные сценарии, которые исследуются и анализируются:

- следование днем и ночью;
- следование в летних и зимних условиях;
- следование в условиях возникновения неисправности технического средства или возникновения технологического нарушения;
- следование при минимальных и укрупненных интервалах пакетного следования;
- движение в условиях отсутствия или наличия барьеров и затруднений: «окон» для ремонта и модернизации пути или устройств контактной сети, временных ограничений скорости;

Очевидно, возможно сочетание указанных сценариев, что должно быть учтено при последующем детальном анализе.

2.2 Исходные положения расчета перегонных времен хода

Рассмотрим выполнение перегонного времени хода с той точки зрения, что это случайная величина (исследование подтверждает обоснованность этого суждения). Применим существующие аналитические инструменты к исследованию данной случайной величины. Формализуя задачу определения оптимального перегонного времени хода, получаем, что возникает необходимость поиска некоторого критического значения перегонного времени хода, фактическое значение которого не будет превышать искомое с заданной вероятностью. Значение критического (искомого) времени хода находится по стандартной методике посредством интегрирования соответствующего сегмента плотности распределения рассматриваемой величины.

С целью выделения влияний, которые приводят к задержкам поездов, выполнен анализ совокупности полученных данных. Поезда группировались по различным признакам, которые характеризуют основные виды влияний. В частности, разделение проведено по направлению движения потока поездов (четное/нечетное), по времени суток (день/ночь), по среднему значению межпоездного интервала при отправлении.

Чтобы определить аппроксимирующую функцию, для каждой из групп данных строится гистограмма времен хода по участку, определяются статистические элементы (математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение) и рассчитываются элементы функции с использованием положений теории вероятностей.

Вероятностная модель исторических данных позволяет определить добавочное время к разработанному нормативному расписанию с учетом различных сценариев формирования поездной обстановки, что имеет непосредственное практическое применение [15].

В ходе работы исследованы статистические характеристики беспрепятственного движения поездов грузового сегмента перевозок по участкам главного хода Транссибирской магистрали. Исследование проведено с целью

оценки степени влияния случайных факторов в чистом виде. Из архивных баз данных исполненного движения выбраны данные о времени проследовании поездами выбранного участка дороги в периоды отсутствия технологических «окон», неисправностей технических устройств и других возмущающих факторов. В итоговую совокупность отобраны составы, которые проследовали по участку без влияния впереди идущих поездов и неграфиковых остановок.

В январе 2018 в период наименьших закрытий перегонов для проведения плановых работ на двухпутном электрифицированном направлении «Облучье – Хабаровск II» общей протяженностью 360 км. в таком режиме проследовали 105 составов нечетного направления и 50 составов четного направления (из общего количества поездов за месяц сформирована выборка только тех поездов, которые проследовали полностью весь участок беспрепятственно). В июле 2018, в период года, когда наблюдалось максимальное число ремонтных «окон» по модернизации пути, контактной сети, в том числе длительных, на этом же участке зафиксировано 24 состава нечетного направления и 4 состава четного направления, проследовавших по участку без неграфиковых остановок (аналогично, из общего количества поездов за месяц сформирована выборка только тех поездов, которые проследовали полностью весь участок беспрепятственно)

Исходя из данных, раскрытых в таблице 4, отсутствие явных дестабилизирующих факторов не исключило опозданий поездов по прибытию на конечную станцию участка.

Таблица 4 – Данные о выполнении расписания грузовыми поездами, проследовавших по участку беспрепятственно

Количество поездов на направлении О-Х	Периоды 2018 г.	
	Январь	июль
проследовавших по направлению (чет.)	50	4
прибывших по графику (чет.)	9	0
проследовавших по направлению (нечет.)	105	24
прибывших по графику (нечет.)	14	5

2.3 Обеспечение выполнения расписания при организации движения виртуально-сцепленных поездов

Проведен анализ характеристик исполненного движения виртуально-сцепленных поездов [73]. Исследованы данные о динамике межпоездного интервала и времени хода по участку. Рассмотрена статистика по движению поездов по участку Хабаровск II – Ружино Дальневосточной железной дороги на протяжении календарного года. В выборку включены 37 пар поездов, следующих в четном направлении. Критериями отбора послужили: факт проследования по всему участку без разъединения, малый интервал отправления (до 10 мин. включительно), а также отсутствие неграфиковых остановок на промежуточных станциях в ожидании окончания работ или обгона приоритетными поездами.

На указанном контрольном участке графиком движения предусмотрен норматив времени хода, равный 396 мин. Ни один исследуемый поезд не уложился в график. Среднее значение времени хода пакетов ВСЦ поездов составило 502 мин. Завышение фактического времени хода обусловлено влиянием совокупности случайных дестабилизирующих факторов. Это влияние усиливается при увеличении интенсивности потока поездов и, как следствие, повышении степени влияния межпоездных конфликтов. Полностью исключить эти факторы путем совершенствования интервального регулирования не представляется возможным по причине стохастической природы транспортного потока, а также ограниченной пропускной способности диспетчерских участков.

С целью выяснения влияния случайных задержек на ВСЦ поезда, изучен характер распределения времен хода для ведущих и ведомых поездов. Гистограммы для опозданий (рисунок 1) показывают идентичность распределений отклонений от графика по прибытию на конечную станцию участка для указанных групп.

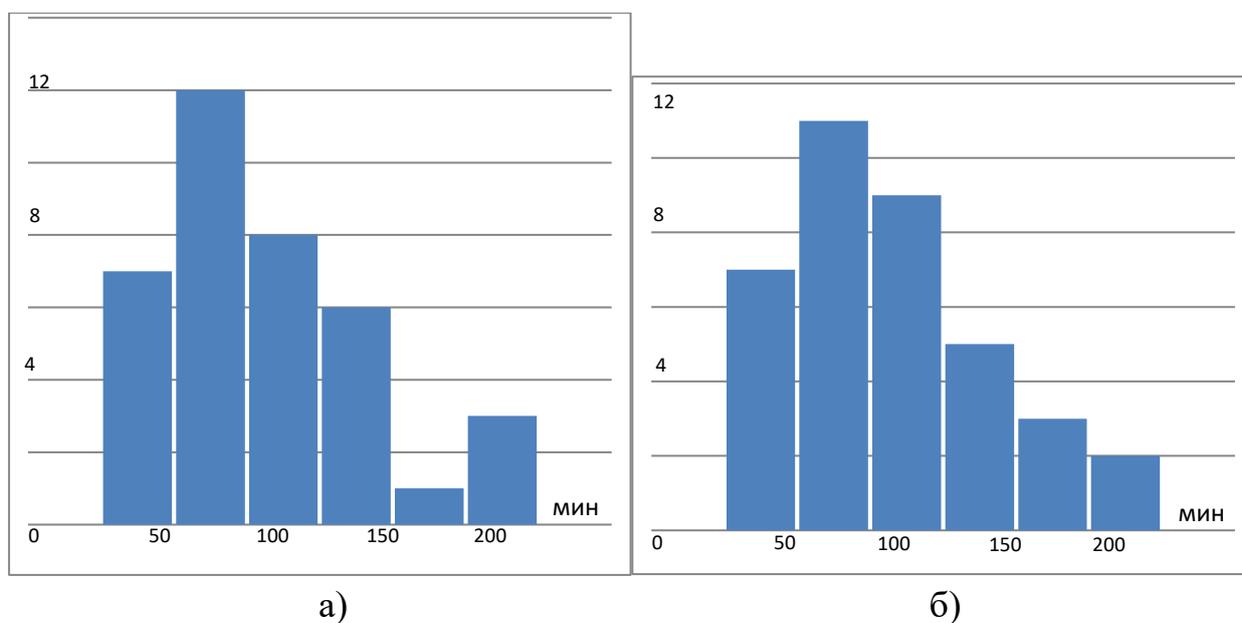


Рисунок 1 – Гистограммы отклонений от графикового времени прибытия для ведущих (а) и ведомых (б) поездов

В исследованной выборке минимальное отклонение от графикового момента прибытия для ведущего поезда составило 31 мин., ведомого – 34 мин. (в сторону увеличения). Средняя величина отклонения по прибытию ведущего составила 106 мин., среднеквадратическое отклонение – 47 мин. Согласно данным официальной статистики, полученным на этапе подконтрольной эксплуатации технологии ВСЦ, в реальном движении показатель участковой скорости по группе ведущих поездов составил 48,4 км/ч, по группе ведомых – 47,9 км/ч. Эти данные корреспондируют с показателями движения поездов, которые пропускались в искусственно созданных свободных условиях (см. раздел 4.3).

Анализ скоростных траекторий поездов показывает, что механизмом формирования опозданий является накопление малых отклонений, вызванных естественными условиями пропуска поездов. Идентичность вероятностных распределений времени опоздания подтверждает, что движение ведущего и ведомого поездов (в каждой паре ВСЦ) отклоняется от графикового единой совокупностью случайных факторов, в частности движение поездов со скоростями, ниже действующих предупреждений на 10-15 проц., а также естественное увеличение продолжительности действия ограничения скорости,

связанное с замедлением и разгоном. В условиях движения в условиях интенсивного графика использование режима автоведения улучшает ситуацию в малой степени. Отсутствие жесткой синхронизации движения ВСЦ поездов, вызванное дискретностью системы интервального регулирования и особенностями алгоритма управления, приводит к увеличению среднего межпоездного интервала в процессе движения по участку.

Примером служит механизм нарушения связности пары поездов, что вызвано прохождением по элементу пути с ограничением скорости, который иллюстрируется рисунком 2. Алгоритм регулирования ВСЦ в процессе подстройки траектории ведомого поезда под динамику ведущего дважды снижает скорость – в интервалах (t'_3, t''_3) и (t''_3, t_y) . В результате межпоездной интервал после прохождения участка ограничения протяженностью 3 км. увеличивается до 13 мин.

Статистика, полученная при реальной эксплуатации технологии ВСЦ, подтверждает утверждение о закономерности увеличения межпоездного расстояния вследствие случайных задержек. Данные показывают, что средний интервал по отправлению сцепленных поездов составляет 8 мин., по прибытию – 13 мин. Учитывая, что графиковый интервал составляет 12 мин. и ВСЦ поезда занимают отдельные пути на технических станциях, где производится смена локомотивных бригад, можно заключить, что явного повышения пропускной способности в серии опытных поездок не наблюдается.

Разработанные предложения по совершенствованию технологии виртуального сцепления поездов включают:

- реализация скоростной траектории движения поездов, максимально приближенной к кривой действующих инфраструктурных ограничений;
- возможность нагона поездов после выхода из зоны действия инфраструктурного ограничения;
- жесткая синхронизация движения обоих поездов при следовании по лимитирующему участку;
- возможности приема ВСЦ поездов на один путь технической станции.

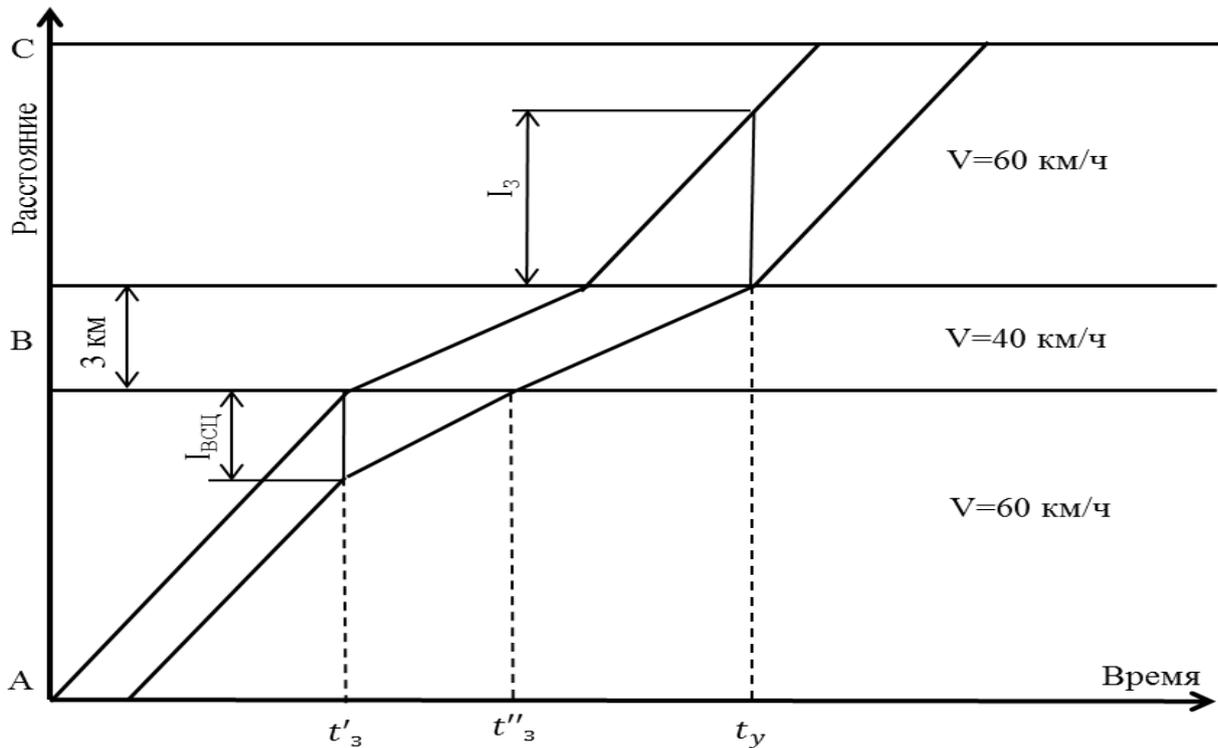


Рисунок 2 – Динамика межпоездного интервала на участке с ограничением скорости

При этом, технология организации движения виртуально-сцепленных поездов практически не требует особых условий формирования и следования, мобильно уступает дорогу приоритетным категориям поездов, исключая остановку встречного поездопотока и необходимость следования пассажирских и пригородных поездов по неправильному пути; при прохождении участков подталкивания ВСЦ поезда беспрепятственно расцепляются на отдельные поезда и после их прохождения также беспрепятственно сцепляются; в зависимости от поездной обстановки технология позволяет удлинять плечи оборота локомотивных бригад. Для Дальневосточной железной дороги организация движения ВСЦ поездов показывает наибольшую эффективность в нечетном направлении от станции Хабаровск 2. Данное направление характеризуется форсированным пропуском поездов в направлении междорожного стыка Архара. Неоднократно показатели сдачи на данный стык составляли 90 поездов, в том числе посредством сокращения межпоездного интервала благодаря технологии виртуального сцепления поездов нечетного направления.

2.4 Обеспечение выполнения расписания при организации движения жестко-сцепленных поездов

Исследована выборка данных по 56 жестко-сцепленным поездам, проследовавшим за тот же период по участку Хабаровск II – Ружино [73]. Критерии отбора сцепок аналогичны критериям отбора ВСЦ поездов. Среднее значение времени хода жестко-сцепленных поездов составило 504 мин, средняя участковая скорость движения – 49,0 км/ч. Гистограмма распределения отклонений моментов прибытия на конечную станцию участка приведена на рисунке 3. Минимальное время отклонения по прибытию на конечную станцию от нормативной нитки для жестко-сцепленных поездов составило 28 мин., максимальное – 188 мин. Среднее опоздание равно 108 мин., СКО – 40 мин.

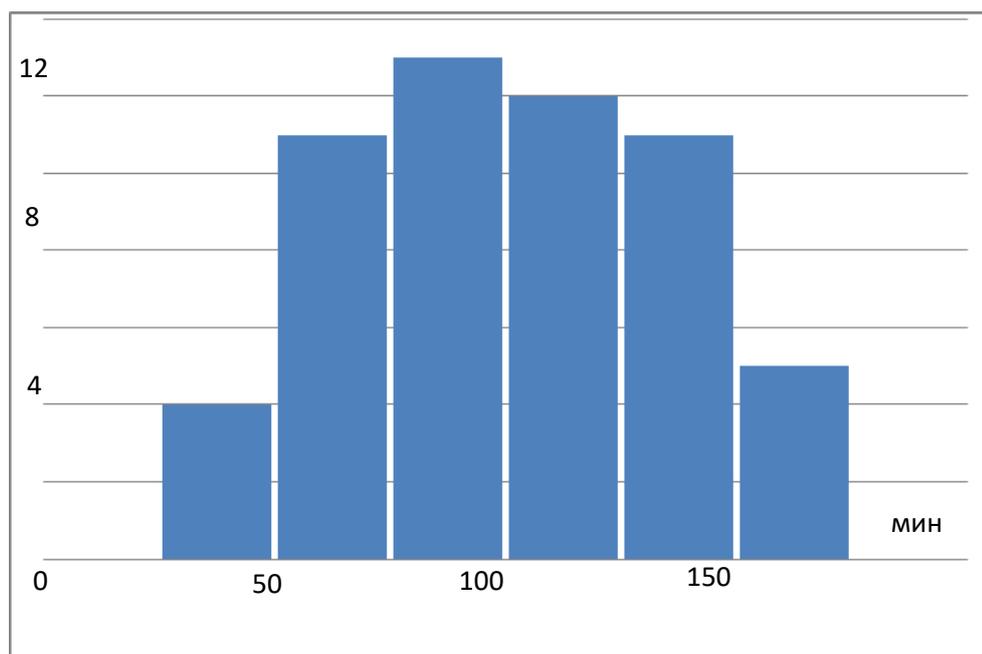


Рисунок 3 – Гистограмма отклонений от графикового времени прибытия для жестко-сцепленных поездов

На текущий момент «узким местом» Дальневосточной железной дороги является железнодорожная станция Хабаровск II. Проведенным анализом установлено, что за последние три года станция принимала не больше 69 четных и 65 нечетных поездов, отправляла не больше 69 четных и 65 нечетных поездов

(таблица 5), при этом соединенный или объединенный контейнерный поезд считается за один.

Таблица 5 – Анализ среднесуточного приема и отправления грузовых поездов станцией Хабаровск II

Год	Принято		Отправлено	
	ср. сут. четных поездов	ср. сут. нечетных поездов	ср. сут. четных поездов	ср. сут. нечетных поездов
2019	69	62	68	64
2020	67	65	69	65
2021	64	63	65	65

Несмотря на то, что объединение поездов не позволяет обеспечивать точность прибытия поездов в интенсивном потоке, при действующей технологии работы и имеющихся технических средствах решающей станции Хабаровск II формирование жестко-сцепленных поездов и объединение контейнерных поездов является значимым методом совершенствования полигонной технологии организации эксплуатационной работы. Кроме того, интенсификация наполнения ниток графика движения минимизирует риск перенасыщения участков главного хода Восточного полигона сети дорог, обеспечивает устойчивость графика движения и сокращает период восстановления графика после транспортных инцидентов и технологических сбояв.

Кроме того, экономическая эффективность объединения контейнерных поездов на Дальневосточной железной дороге за два месяца 2022 г. характеризуется экономией 235 ниток графика, 487 рабочих смен локомотивных бригад по четырем депо дороги, 4,04 млн. руб. за рабочее время локомотивных бригад, 1500,1 тыс. кВт*ч электроэнергии. Применение данной технологии сопровождается увеличением показателя среднего веса поезда на 15,2 т., показателя производительности локомотива на 5,5 тыс. т*км брутто среднесуточно [73].

2.5 Методика вероятностного анализа и расчета времени хода поездов и ее практическое применение

Разработанная методика моделирования учитывает случайные процессы, оказывающие непосредственное влияние на движение поездов [72]. Используя расчетные плотности распределений времени хода по участку, можно обосновать элементы графика, которые обеспечивают заданный уровень точности прибытия.

Методика вероятностного моделирования заключается в определении параметров функции, аппроксимирующей кривую распределения вероятностей времени хода. Исходная статистическая информация извлекается из баз данных исполненного движения грузовых поездов. После построения и обработки вариационного ряда формируются гистограмма и гипотетическая плотность распределения, определяются его параметры.

Ранее показано, что рассеяние случайной величины, характеризующей время хода поездов по участку, адекватно описывается гамма-распределением со сдвигом [85]. Для каждого из наборов экспериментальных данных проверим статистическую гипотезу о том, что выборка взята из распределения, характеризуемого гамма-плотностью:

$$l(t; \alpha_1, \beta) = I(t > 0) \frac{e^{-t/\beta} t^{\alpha_1 - 1}}{\Gamma(\alpha_1) \beta^{\alpha_1}} \quad (4)$$

где $\alpha_1 > 0$, $\beta > 0$ – параметры, характеризующие распределение.

Задача – проверить гипотезу о том, что выборки, соответствующие реальным временам хода поездов, обладают гамма-распределением. Задача решается путем сравнения полученной статистики с критическим значением. В процессе анализа сравниваются эмпирическая и гипотетическая функции распределения.

Для проверки адекватности выдвинутого предположения используется критерий Колмогорова. Критическое значение критерия определяется по формуле:

$$\lambda_n(\alpha) \approx \frac{\lambda_\alpha}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

где α – уровень значимости критерия, λ_α – корень уравнения

$$1 - K(\lambda) = \alpha \quad (6)$$

где $K(\lambda)$ – функция Колмогорова, n – объем выборки.

Задавшись уровнем значимости $\alpha=0,1$, имеем значение корня $\lambda_\alpha = 1,224$.

Выводы об адекватности принятой модели основываются на значении статистики

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (7)$$

где $F_n(x)$ – эмпирическая функция распределения, $F(x)$ – гипотетическая функция распределения.

Для определения значения статистики D_n по выборке определяются элементы гипотетического распределения. Интересующую нас случайную величину “время хода” обозначим через ρ . Известно, что

$$E\rho = \alpha_1\beta, \quad D\rho = \alpha_1\beta^2. \quad (8)$$

По статистическим данным выборки находится выборочное среднее по формуле:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j \quad (9)$$

и выборочное среднеквадратичное отклонение:

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_j - \bar{p})^2} \quad (10)$$

Путем постановки в формулу (8) $\bar{\rho}$ вместо $E\rho$, и s_0^2 вместо $D\rho$, решается система уравнений:

$$\begin{cases} \bar{\rho} = \alpha_1 \beta \\ s_0^2 = \alpha_1 \beta^2 \end{cases} \quad (11)$$

Указанная система уравнений решается относительно элементов α_1 и β .

Для вычисления статистики D_n требуется построение вариационного ряда, эмпирической функции распределения и формулы гипотетической функции распределения, соответствующей плотности (4).

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t; \alpha_1, \beta) dt \quad (12)$$

Следующим шагом является расчет приближенного критического значения критерия для выборки по формуле (5). После проведенных вычислений сравниваются значения статистики и критического значения. В случае, когда значение статистики не превышает критическое значение, выдвигаемая гипотеза принимается.

Нормативное время хода, закладываемое в график, определяется, исходя из заданной вероятности выполнения показателя точности прибытия. Определение нормативного времени производится путем интегрирования соответствующего сегмента плотности распределения вероятностей $f(t_x)$ указанной величины. Известно, что площадь под кривой плотности, отсекаемая значением заданного времени хода t_{x0} , соответствует указанной вероятности.

Разработанную методику применяем для анализа реальных данных. Для наглядности исследуются распределения времени хода поездов (в целом по участку) по главному ходу Дальневосточной железной дороги на участке Хабаровск II – Облучье. Данные сгруппированы в четыре выборки. Первая и вторая выборки характеризуют поток поездов нечетного направления, следовавших в январе 2018 года. Первая относится к поездам, следовавшим в светлое время суток, вторая – к поездам, следовавшим в темное время суток.

Объем первой выборки $n=55$, объем второй выборки $n=50$. Третья и четвертая выборки относятся к нечетным поездам, следовавшим в июле 2018 года. Третья и четвертая выборки (размером 16 и 8 единиц) относятся к нечетным поездам, – соответственно дневным и ночным.

Проанализируем процесс движения нечетных поездов, проследовавших в январе 2018 г. в светлое время суток. Объем выборки $n=55$. По статистическим данным выборки находим выборочное среднее по формуле (9) и выборочное среднеквадратичное отклонение по формуле (10):

$$\bar{p} = 367,3, \quad S_0 = 14,3.$$

По формуле (11) получены значения точечных оценок элементов распределения:

$$\alpha_1 \approx 659.8, \quad \beta \approx 0.56.$$

В результате стандартных вычислений определяем величину $D_n = 0.088$. Приближенное критическое значение критерия для данной выборки рассчитано по формуле (5), равно 0,165.

Элемент статистики, равный 0,088 значительно меньше критического значения, равного 0,165. Сравнивая значения, делаем вывод о том, что проверяемая статистическая гипотеза не противоречит выборочным данным по критерию Колмогорова с уровнем значимости 0.1.

На рисунке 4 представлены гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода для рассматриваемых условий.

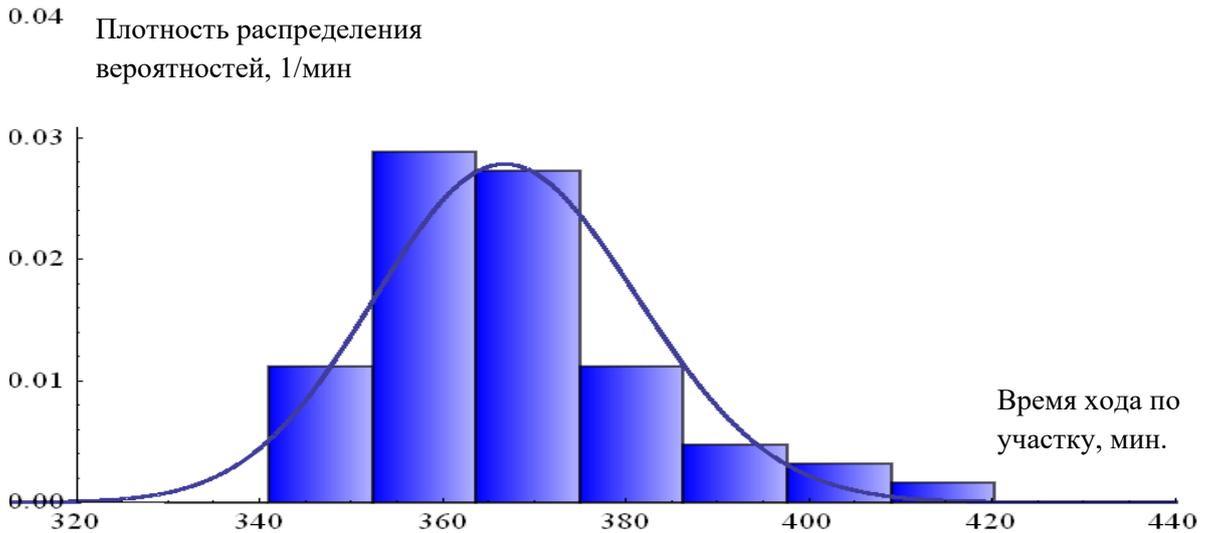


Рисунок 4 – Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода (нечетные поезда, светлое время суток)

Задавшись уровнем выполнения графика 95 проц., получаем, что необходимо устанавливать графиковое время хода для нечетных поездов для рассмотренного сценария, равное 385 мин. В приложении к диссертации № 2 представлен график движения поездов, разработанный автором совместно со специалистами АО «ВНИИЖТ» при помощи программного комплекса АПК «ЭЛЬБРУС», в котором предусмотрено рассчитанное время хода. В графике движения заложен увеличенный межпоездной интервал, равный 12 мин., при этом количество ниток нечетных поездов составило 60, в которых 33 – нитки соединенных поездов, либо объединенных контейнерных поездов. Общее количество заложенных в график поездов составляет 93. Средняя участковая скорость составляет 60 км/ч. Таким образом, при комплексном использовании технологии спаренного пропуска грузовых поездов и предложенной методики корректировки элементов графика движения, пропускная способность участков остается прежней, при этом, улучшаются показатели точности прибытия грузовых поездов на технические станции и устойчивости графика движения.

Проанализируем процесс движения нечетных поездов, проследовавшие в январе 2018 г. в темное время суток. Объем выборки составляет 50 единиц. Приведем краткое описание вычислений.

Приближенное критическое значение критерия для данной выборки равно $\frac{\lambda_{\alpha}}{\sqrt{n}} = \frac{1.224}{\sqrt{50}} = 0.173\dots$ По выборке определяются $\bar{\rho} = 370.1$, $s_0 = 18.6$. Решая систему уравнений (11), определяем элементы $\alpha_1 = 395.03$, $\beta = 0.94$. Рассчитываем значение статистики: $D_n = 0.132$. Значение статистики значительно меньше критического значения, следовательно, проверяемая статистическая гипотеза не противоречит выборочным данным по критерию Колмогорова с уровнем значимости 0.1. Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода представлены на рисунке 5.

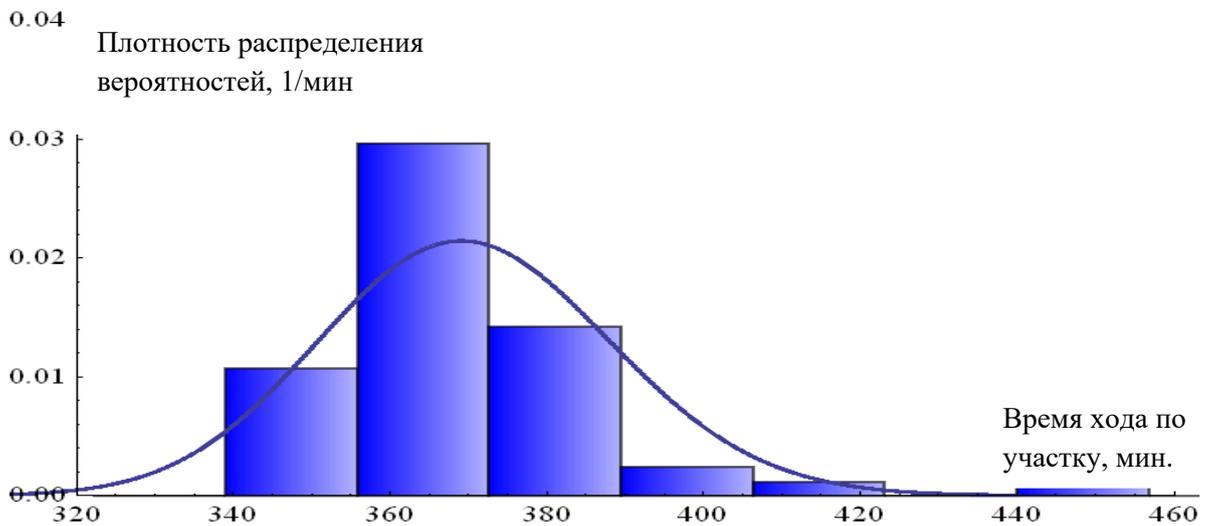


Рисунок 5 – Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода (нечетные поезда, темное время суток)

Задавшись уровнем выполнения графика 95 проц., получаем, что графиковое время хода для нечетных поездов по участку Хабаровск II – Облучье для рассмотренного сценария составляет 390 минут.

Предложенную методику используем при анализе процесса движения нечетных поездов, проследовавшие в июле 2018 г. в светлое время суток. Объем выборки $n=16$. Постановка задачи и решение по данной выборке аналогичны предыдущим рассуждениям, поэтому ниже приведено краткое описание вычислений.

Критическое значение критерия для выборки, характеризующей движение нечетных поездов в светлое время, равно $\frac{\lambda_\alpha}{\sqrt{n}} = \frac{1.224}{\sqrt{16}} = 0.306$, значение статистики $D_n = 0.126$. Значение статистики значительно меньше критического значения, следовательно, проверяемая статистическая гипотеза не противоречит выборочным данным по критерию Колмогорова. Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода представлены на рисунке 6.

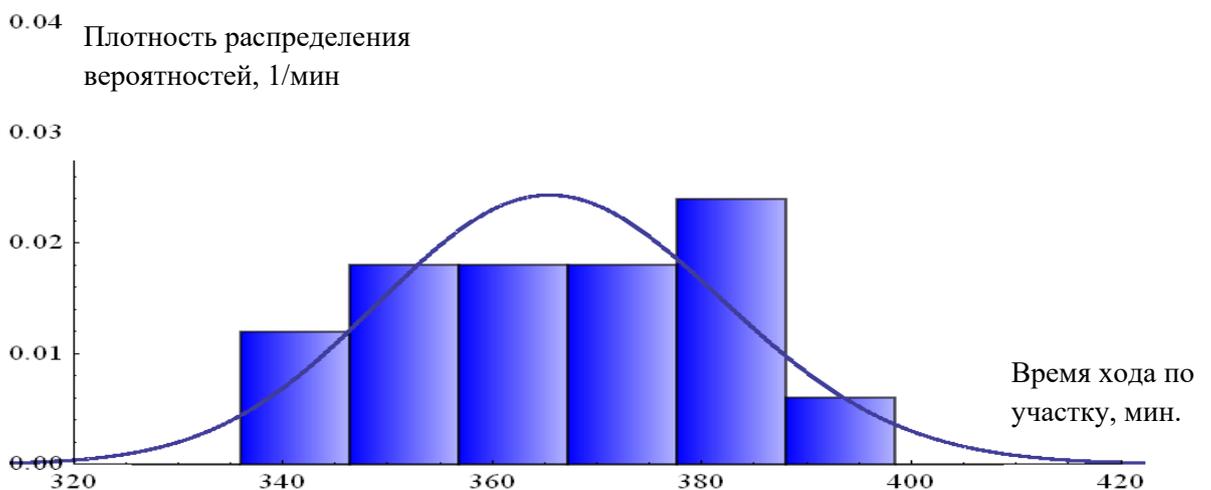


Рисунок 6 – Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода (нечетные поезда, светлое время суток)

Задавшись уровнем выполнения графика 95 проц., получаем время хода для рассмотренного сценария, равное 385 мин.

Предложенную методику используем при анализе процесса движения нечетных поездов, проследовавшие в июле 2018 г. в темное время суток. Объем выборки $n=8$. Постановка задачи и решение по данной выборке аналогичны предыдущим рассуждениям, поэтому ниже приведено краткое описание вычислений.

Критическое значение критерия для выборки по нечетным поездам, темному времени суток равно $\frac{\lambda_\alpha}{\sqrt{n}} = \frac{1.224}{\sqrt{8}} = 0.4327\dots$, значение статистики – $D_n = 0.246$. Проверяемая статистическая гипотеза не противоречит

выборочным данным по критерию Колмогорова. Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода представлены на рисунке 7.

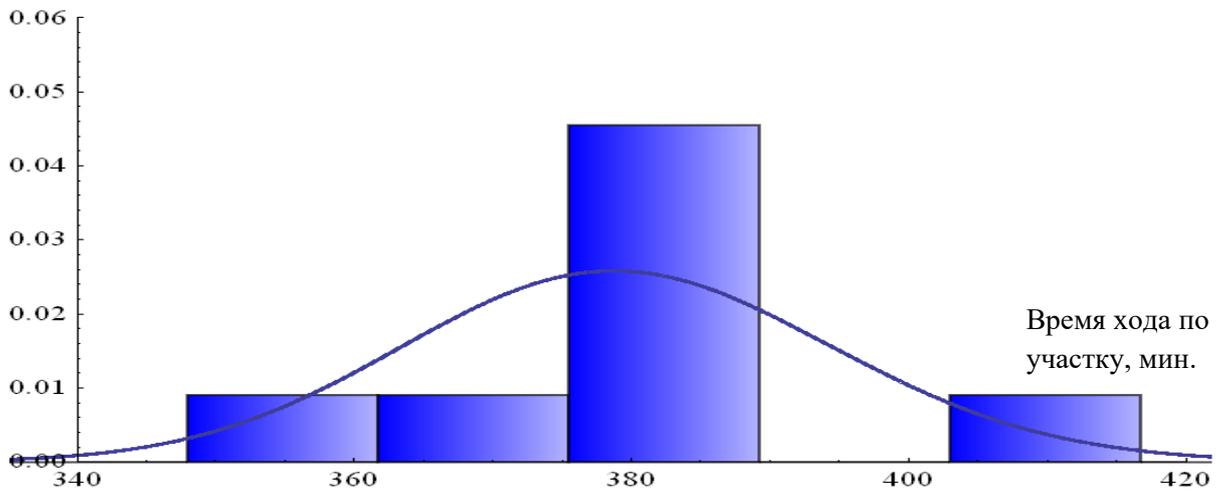


Рисунок 7 – Гистограмма и гипотетическая плотность распределения вероятностей выполнения времени хода (нечетные поезда, темное время суток)

При уровне выполнения графика 95 проц. время хода для нечетных поездов по участку для рассмотренного сценария составляет 395 мин.

2.6 Использование технологии больших данных в задачах оптимизации транспортных процессов

Big Data – это информационные ресурсы, которые имеют большой объем, растут высокими темпами, поступают из различных источников в разных форматах и требуют эффективных инновационных способов обработки информации для автоматизации технологических процессов. В настоящее время разработаны алгоритмы обработки больших массивов данных в режиме реального времени для транспортного сегмента обслуживания клиентов и пассажиров. В статье [9] представлен обзор использования технологий Big Data в сфере транспортных и логистических услуг при планировании и прогнозировании спроса, маршрутизации, анализе удовлетворенности клиентов, а также управлении рисками. В статье [105] описана стохастическая модель управления авиакомпанией в условиях неопределенностей и потенциальных рисков. Данная модель включает в себя сбор, накопление, хранение и обработку данных, связанных с разработкой, тестированием, изготовлением, использованием и обслуживанием воздушных судов и сервисных продуктов компании в режиме реального времени. В основе алгоритма лежит оптимизационная задача минимизации суммарных рисков по каждому отдельному элементу в комплексе по оказанию транспортной услуги. В статье [24] описано решение задачи по переходу от планового ремонта железнодорожной инфраструктуры и тягового подвижного состава к превентивному ремонту на основе контроля предотказного состояния. Разработана и представлена математическая модель для прогнозирования предотказных состояний локомотивов, которая позволяет минимизировать количество unplanned ремонтов локомотивов и в целом улучшить ситуацию в сфере железнодорожных перевозок. В статьях [3, 107] раскрываются возможности применения технологий Big Data в сфере городского общественного транспорта. В [3] описаны результаты реализации пилотного проекта по управлению перекрестным светофором в центре города Минска.

Данная технология решает задачу минимизации задержек трамвайного транспорта на перекрестке и перехода к следующей фазе работы светофора непосредственно после прохода трамвая через данный перекресток. Кроме того, в статье описаны результаты внедрения специального механизма, располагаемого в моторном блоке городского автобуса для постоянного сбора данных о работе двигателя с привязкой к текущему времени. В результате анализа массива полученной информации сформирована необходимая база, которая доказывает обоснованность перехода на гибридные двигательные установки. В основе такого решения находился анализ режимов работы двигателя в реальных условиях с учетом времени в движении, времени простоев на остановках и светофорах, а также динамики процессов разгона и замедления. В [106] коллективом авторов проиллюстрирована модель качественного сбора данных посредством комплексного считывания информации со специальных датчиков, установленных на автомагистралях и перекрестках, а также со спутниковых систем контроля автомобильного трафика. После сбора, накопления и аналитической обработки данных, выявлены узкие места в организации дорожного движения. Показательна статья [2], в которой предложена модель автоматизированного формирования вариантных графиков движения поездов с учетом данных спутникового позиционирования. В данной публикации авторами представлена схема сбора и обработки исходной информации для построения вариантных графиков в условиях длительных закрытий. При этом в основе предлагаемого алгоритма прогнозирования лежат тяговые расчеты, которые не позволяют формировать реализуемые элементы графика в условиях плотного и интенсивного потока поездов.

2.7 Автоматизация сбора, накопления, сортировки и обработки данных для расчета элементов графика движения

2.7.1 Схема автоматизированного формирования перегонных времен хода

Время хода по перегону является одним из базовых элементов построения графика движения поездов. В современных условиях учет перегонных времен хода носит достаточно субъективный характер. Теоретическое значение данного показателя заключается во времени между моментами пересечения середины состава поезда с серединами станций, ограничивающий данный перегон. На практике учет отличается – системы контроля движения поездов фиксируют моменты проследования выходного и входного светофоров. На технических станциях начала и окончания маршрута поезда моменты отправления и прибытия фиксируются ручным вводом оператора. Кроме того, моменты фактического отправления, прибытия и проследования формируются в электронных маршрутах машинистов.

В железнодорожной отрасли происходит накопление массива данных о выполнении перегонных времен хода в различных условиях. Базы данных исполненного движения используются, главным образом, для камеральной постобработки – оценки эксплуатационной работы. Эти данные не используются для дальнейшего построения графика движения. В настоящей работе представлена методика эффективного использования архивных данных с целью повышения уровня пунктуальности в грузовом сегменте железнодорожных перевозок. Предложенная методика служит основой для автоматизированного формирования перегонных времен хода, схема которой представлена на рисунке 8. Базовая идея предлагаемой схемы заключается в увязке источников формирования сырых данных и программы по математической обработке случайных чисел с целью получения адекватных элементов графика для различных сценариев оперативной обстановки.

Системы «Источники» – это существующие и действующие программные комплексы отображения и фиксации данных об исполненном движении. Система «Документирование и представление результатов анализа» – это конечный продукт, представляющий собой рассчитанные и статистически обоснованные перегонные времена хода по четному и нечетному направлениям. Цветом выделена система «Работа с данными», которая включает в себя три подсистемы, предназначенные для накопления, сортировки и обработки данных. Разработка и реализация программного комплекса, обеспечивающего работу данных подсистем, является наиболее сложным элементом в рамках решения задачи по определению элементов графика, обеспечивающих высокий уровень пунктуальности в сегменте грузовых перевозок.



Рисунок 8 – Схема реализации процесса расчета перегонных времен хода

2.7.2 Алгоритм накопления, сортировки и обработки данных

Платформа интеграции и хранения сырых данных об исполненном движении поездов является неотъемлемой частью комплексной аналитической системы, требующей соответствующей программной инфраструктуры. Ввиду значительных объемов данных о выполнении перегонных времен хода на сети дорог, формирующихся ежеминутно, разработка инфраструктуры для их хранения и предварительной обработки должна отвечать ряду требований:

- обеспечение интеграции данных из различных источников;
- исключение «всплесков» из всего массива данных;
- определение условий выполнения перегонных времен хода;
- обеспечение информационной безопасности.

В работе алгоритма особое внимание уделяется сортировке данных. Основным положением корректировки элементов графика в виде перегонных времен и межпоездных интервалов служит применение статистических характеристик технологических операционных времен, полученных при различных типовых сценариях функционирования направления железной дороги. Обработка данных осуществляется в зависимости от условий выполнения перегонных времен хода и категории поездов (пассажирские, грузовые, сборные, хозяйственные поезда и резервные локомотивы). Диапазон определения условий можно расширить. Например, после статистического анализа причин первичных задержек потока поездов можно усовершенствовать алгоритм таким образом, что график движения будет перестраиваться в автоматическом (адаптивном) режиме определенным образом в зависимости от причины сбоя. Таким образом, алгоритм можно использовать для построения адаптивного графика движения.

После формирования массива данных относительно конкретных условий и сценариев формирования поездопотока происходит математическая обработка данных в соответствии с описанной выше методикой вероятностного моделирования. Результаты вычислений сводятся в таблицу перегонных времен хода для каждого перегона. Пример визуализации итоговых данных представлен в

таблице 6. Расчетные времена хода используются для формирования ниток графика движения в адаптивном режиме, позволяя объективно оценивать поездную ситуацию и строить адекватные прогнозы в зависимости от оперативной ситуации на диспетчерском участке.

Таблица 6 – Визуализация расчетов перегонных времен хода

Перегон	Перегонное время хода	
	Четное направление	Нечетное направление
А-Б	26 мин	25 мин
Б-В	17 мин	19 мин
В-Г	21 мин	22 мин
Г-Д	11 мин	11 мин
Д-Е	23 мин	22 мин
Е-Ж	20 мин	21 мин
Ж-З	29 мин	31 мин

Результаты по второй главе

1. В главе рассмотрены отклонения от нормативного графика движения с точки зрения сопоставления времен хода, фактически затраченных на проследование поездами участка, с нормативными временами хода, установленными для данного участка. Время отправления поезда с технической станции принимается за условную нулевую отметку, от которой начинается выполнение графика движения. В случае следования поезда по нормативной нитке, фактическое и нормативное времена будут совпадать. В противном случае будет наблюдаться разница времен хода, что говорит о нарушении установленного графика. Следовательно, разница фактического и нормативного времен хода составит величину отклонения от установленного графика движения поездов для отдельно взятого грузового поезда.

2. Архивные данные наглядно иллюстрируют, что заданное время проследования диспетчерского участка грузовыми поездами, в том числе жестко- и виртуально-сцепленными, выполняется действительно редко. Предположение, заключающееся в том, что бригады искусственно замедляются и тем самым увеличивают перегонные времена хода для экономии расхода электроэнергии, статистика не подтверждает (глава 4). Соответственно, при одинаковом параметре удельного расхода электроэнергии при отличающихся перегонных временах, автором фокусируется внимание на точности соблюдения расписания. Полученным анализом времен хода для двухпутного направления Транссибирской магистрали Дальневосточной железной дороги Хабаровск II – Облучье определено, что время хода для обоих направлений следования как случайная величина аппроксимируется гамма-распределением. Следовательно, в случае беспрепятственного хода грузовых поездов по направлению Хабаровск II – Облучье характер распределения времени хода не зависит от периода года и времени суток, подчиняется гамма-закону. Сформирована и представлена методика, предназначенная для обоснования времени хода для составов грузовых поездов. Гамма-распределение соответствует сценарию беспрепятственного

следования при отсутствии дестабилизирующих факторов, таких, как отказы технических средств, «окна» для ремонта пути или контактной сети, не ритмичный прием техническими станциями и другие.

3. Таким образом, предлагаемая методика, имея фокус на повышение уровня пунктуальности в грузовом сегменте перевозок, не противоречит условию выполнения сроков доставки и условию эффективного энергопотребления. Недостаток методики, который заключается в значительных трудовых и временных затратах в процессе сбора, сортировки и обработки данных, компенсируется разработкой алгоритма автоматизированного выполнения указанных операций.

4. Разработанное в рамках исследования предложение о корректировке элементов графика движения в зависимости от текущей поездной обстановки привело к улучшению расписания по прибытию поездов в пределах Дальневосточной железной дороги: в 2021 г. повышен уровень точности выполнения расписания договорных поездов по прибытию на станции назначения на 5,46 проц. по отношению к 2020 г. и на 6,03 проц. по отношению к 2019 г.; в 2021 г. повышен уровень точности выполнения расписания поездов, следующих не на договорной основе, по прибытию на станции назначения на 6,06 проц. по отношению к 2020 г. и на 13 проц. по отношению к 2019 г.

5. На основе проведенного анализа можно заключить, что спаренный пропуск поездов не позволяет компенсировать влияние случайных возмущений и обеспечить регулярное движение грузовых поездов строго по графику. Это является препятствием для повышения интенсивности потока и, следовательно, степени использования пропускной способности.

6. При комплексном использовании технологий спаренного пропуска грузовых поездов, объединения контейнерных поездов и предложенной методики корректировки элементов графика движения, характеристики пропускной способности участков и средней участковой скорости сохраняются, при этом, улучшаются показатели точности прибытия поездов грузового вида движения на узловые станции и устойчивости графика движения (Приложение 2)

3 МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖПОЕЗДНЫХ ИНТЕРВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

3.1 Исходные положения по определению межпоездных интервалов

В основу построения графика для отдельного участка кладутся пространственно-временная траектория движения стандартного грузового поезда и характеристики наличной инфраструктуры. Соответственно, существующая модель имеет существенный минус, заключающийся в том, что не учитываются характеристики потока грузовых поездов в целом (интенсивность, плотность). Отсутствие учета межпоездных конфликтов и несинхронного характера движения при формировании графика влечет вторичные последствия в виде дополнительного съема поездов пассажирским движением, завышению рабочего времени локомотивных бригад, а также снижению качества использования инфраструктуры и завышению энергетических затрат. Кроме того, работа данной модели не учитывает влияние случайных факторов, которые приводят к существенным отклонениям от графика. Точность продвижения потока грузовых поездов также зависит от погодных условий, времени суток, времени года, состояния инфраструктуры и других факторов.

Настоящая глава посвящена исследованию методических вопросов долгосрочного прогнозирования и планирования движения составов грузовых поездов по критерию точности доставки. Предлагаются способы группового регулирования движением. Исследуются статистические характеристики движения грузовых поездов на магистральной железнодорожной линии.

В основу эффективного способа установления межпоездных интервалов для грузового движения кладется математическая модель организации движения. При построении данной модели принимаются во внимание статистические характеристики движения поездов и технологии работы узлов, которые получены на основе анализа архивных данных об исполненном движении. Эта информация

используется для того, чтобы спрогнозировать вероятностный процесс появления отклонений от графика и межпоездных конфликтов в предстоящие периоды.

В настоящей главе приводится доказательная база о взаимном влиянии важнейших элементов графика движения поездов – времени хода по участку и межпоездных интервалов между поездами по отправлению с технических станций.

Теоретически обоснованными критериями построения нормативного графика движения являются равномерность и ритмичность распределения поездопотока. Данные принципы заключаются в экономически эффективном, рациональном использовании пропускной и провозной способностей инфраструктуры, а также перерабатывающих способностей технических станций. Равномерность предполагает формирование приблизительно одинаковых межпоездных интервалов для предъявляемого грузового потока по отправлению с начальных станций. Ритмичность предполагает постоянную загрузку объектов инфраструктуры и поточность выполнения технических операции. Данные принципы формируют экономически эффективную модель организации движения поездов, которая заключается в минимизации энергетических потерь от влияния поездов друг на друга, а также влияния остановок поездов у проходных и входных сигналов, требующих снижения скорости или остановки.

Как уже было сказано выше, основные элементы графика движения поездов, а именно перегонные времена хода и межпоездные интервалы формируются на основе тяговых расчетов с учетом технических характеристик участков и подвижного состава. Статистика подтверждает, что расчетные характеристики разработанного расписания для грузовых поездов не отражают реальную картину продвижения поездов, в том числе одиночных поездов, следующих безостановочно по участку исключительно по зеленым сигналам светофоров, без неграфиковых остановок, технологических «окон», возникающих неисправностей и других дестабилизирующих факторов.

Также построение нормативного графика не предусматривает процесс взаимодействия поездов в потоке, интенсивность которого имеет свои всплески и

спады в разные периоды суток. Соответственно, в периоды интенсивного движения вероятность возникновения конфликтов между поездами возрастает. В этой ситуации возникновение первичной задержки влечет за собой ряд вторичных задержек, минимизация которых производится в оперативном порядке путем диспетчерской регулировки. При снижении интенсивности потока влияние поездов друг на друга оказывается незначительным, что отражает минимизацию межпоездных конфликтов при данной модели организации движения поездов.

В условиях возникновения межпоездных конфликтов, реакция машинистов будет неоднозначной и зависит от квалификации, опыта, стажа работы и других персональных факторов. На продвижение поездопотока значительное влияние оказывают внешние факторы, такие как текущее состояние инфраструктуры, локомотивного парка, погодные условия.

В статье [98] рассмотрена проблема управления потенциальными задержками продвижения пассажирских поездов с учетом того, что большинство пассажиров пересекаются с одного поезда на другой в процессе следования к пункту назначения. Таким образом, возникает задача управления следованием второго поезда, ожидающего пассажиров, в случае задержки первого поезда.

В статье продемонстрирована прогнозная модель, способная спрогнозировать комплекс различных сценариев возникновения задержек. Авторами представлена on-line стратегия управления задержками, отличная от существующих стратегий своей простотой, практичностью и надежностью. Ценность описанной стратегии подтверждена рядом экспериментов.

В целом, стратегия управления задержками отвечает на вопрос о том, как реагировать наилучшим образом в случае возникновения первоначальной задержки на магистральной железнодорожной линии с учетом того, что общие задержки пассажирских поездов сведутся к минимуму. Проблемы в продвижении пассажиропотока могут быть самого разного характера (сбои в работе сигнализации и автоматизации, позднее прибытие локомотивной бригады, неплановые работы на инфраструктуре и т.д.). Такие сбои возникают в

каждодневной практике достаточно часто и приводят к существенным сбоям в расписании.

Задержка поезда на одной железнодорожной линии может повлечь за собой задержки на других направлениях, и итоговую цифру допущенных задержек поездов может уменьшить лишь грамотная регулировка движения диспетчером поездным (например, путем изменения порядка пропуска поездов, ввода компенсирующего интервала между поездами по отправлению с технической станции). Следовательно, если две первоначальные задержки случаются в короткий период времени после друг друга, вторая задержка может и не иметь того влияния, что оказывает первичная задержка, так как второй поезд, имеющий первичную задержку, и так будет остановлен по причине допущенной задержки первым поездом.

После восстановления движения поезд, допустивший задержку, накладывается на нитку графика другого поезда, при этом последующие поезда также сбиваются с нормативного расписания, нападываясь на соседние нитки графика. То есть, первичная задержка оказывает непосредственное влияние на последующие задержки в продвижении поездопотока. Проведенным анализом, представленном в статье [98], автором выделяются две задержки и дальнейшее влияние на продвижение поездопотока каждой из них. Первый поезд в пакете оказывает большее влияние на последующие поезда. Если в период допущенной задержки первого поезда, произошла задержка второго и последующего поездов, то влияние второго поезда будет несущественным.

Для разработки устойчивого графика движения данные ограничения и сбои должны быть изначально учтены в работе. Межпоездные интервалы, а также интервалы скрещения оказывают существенное влияние на характеристику надежности графика. В каждую минуту возникают межпоездные конфликты, как на однопутной, так и на двухпутной линии. Таким образом, возникают дополнительные затруднения при формировании модели управления задержками в описанных условиях.

В работе [88] описана модель задержек при организации следования пакета грузовых поездов по диспетчерскому участку с применением вероятностного подхода. При анализе процесса размножения опозданий итоговое время следования поезда рассматривается как сумма случайных интервалов следования по сегментам участка.

В дальнейшем, рассматривается задача взаимодействия двух поездов в потоке, которые имеют различную скорость движения и подвержены влиянию случайных воздействий. Результат анализа используется для моделирования движения поездов в плотном неоднородном потоке. Эта идея развивается в работах [36, 75, 89, 95, 100, 102].

Общими характеристиками графика движения, который реализуется в условиях случайных возмущений, принято считать его устойчивость и стабильность. Под устойчивостью графика понимают его способность поглощать малые текущие возмущения [99]. Система управления, которая обеспечивает устойчивость, эффективно противостоит возникающим отклонениям. С увеличением интенсивности движения компенсаторный механизм начинает отказывать, что приводит к размножению задержек. Характеристика, которая показывает способность к ликвидации возникающих возмущений, определяется как стабильность графика [77] и соотносится с интервалом времени, который необходим для восстановления нормативного движения.

3.2 Методика анализа статистических данных об исполненном движении, ее практическое применение

Для определения элементов графика движения грузовых поездов анализируется график исполненного движения за аналогичный период прошлого года на предмет выполнения времени хода по участку поездов в потоке, а также межпоездных интервалов между поездами. При этом берется выборка поездов, следующих в пакете. Первый поезд в этой выборке следует без остановок по всему участку следования. Назовем это движение свободным ходом. Второй, третий и последующие поезда в определенный момент, в зависимости от межпоездного интервала по отправлению с начальной станции, догоняют впереди идущий поезд и начинают следовать в условиях межпоездных конфликтов. Предлагаемая методика предлагает формирование основных элементов графика движения на основе статистического анализа исторических данных, удовлетворяющих определенному сценарию формирования поездопотока.

Необходимо отметить, что следование поездов в потоке является одним из возможных сценариев организации движения поездов.

В январе 2018 г. в период незначительных закрытий перегонов для проведения длительных технологических работ на участке «О–Х» протяженностью 360 км. проследовало 25 пакетов нечетного направления с количеством поездов в каждом пакете от двух до семи, и 13 пакетов четного направления с количеством поездов в каждом пакете от двух до десяти. За этот же период на участке «Х–Р» протяженностью 417 километров проследовало 11 пакетов нечетного направления и 12 пакетов четного направления.

Обязательными условиями формирования выборки послужили:

1. первый поезд в пакете следовал безостановочно;
2. поезда в пакете следовали по всему участку;
3. вторые и последующие поезда догоняли впереди идущий поезд.

В данных условиях ни один поезд не проследовал участок по установленному нормативу времени, рассчитанному посредством тяговых

расчетов, что означает, что ни один поезд не прибыл на конечную станцию участка по расписанию, даже с установленной погрешностью 5 мин.

С целью выделения влияний, которые приводят к задержкам поездов, выполнен факторный анализ совокупности полученных данных. Поезда группировались по различным признакам, которые характеризуют основные виды влияний. В частности, разделение проведено по направлению движения потока поездов (четное/нечетное).

Для каждой из групп строится график времен хода по участку и интервалов по отправлению, определяются статистические элементы (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение) и рассчитывается аппроксимирующая функция.

Статистический анализ исторических данных позволяет определить добавочное время к разработанному нормативному расписанию с учетом различных сценариев оперативного формирования поездной обстановки, что имеет непосредственное практическое применение с учетом автоматизированного формирования графика движения поездов.

3.3 Влияние межпоездных интервалов на время хода поездов грузового вида движения

Выдвинем предположение о взаимозависимости элементов межпоездных интервалов и перегонных времен хода. Исходя из детерминированного подхода формирования нормативного (сводного) графика движения, где каждый поезд рассматривается как некая единичная точка, зависимость не должна прослеживаться. Данный подход ведет к построению идентичных ниток при равномерном распределении поездопотока в течение суток.

На рисунках 9 и 10 представлены возможные сценарии следования поездов для разреженного и плотного графиков. Сплошными линиями показаны нитки нормативного графика движения для поездов А, Б и В, пунктирными линиями представлены нитки графика, отображающие влияние случайных факторов на продвижение поездов. Соответственно, нитка нормативного графика имеет фиксированное время хода t (норм), пунктирная нитка имеет t (вероятн).

При анализе исторических данных взаимозависимость элементов графика движения поездов прослеживается достаточно четко (рисунки 11 и 12). В ходе исследования рассмотрены два участка главного хода Транссибирской магистрали Хабаровск II – Ружино и Хабаровск II – Облучье Дальневосточной железной дороги. Поезда распределены по направлениям – четное (преобладают груженые маршруты с запада на восток) и нечетное (преобладают порожние составы с востока на запад).

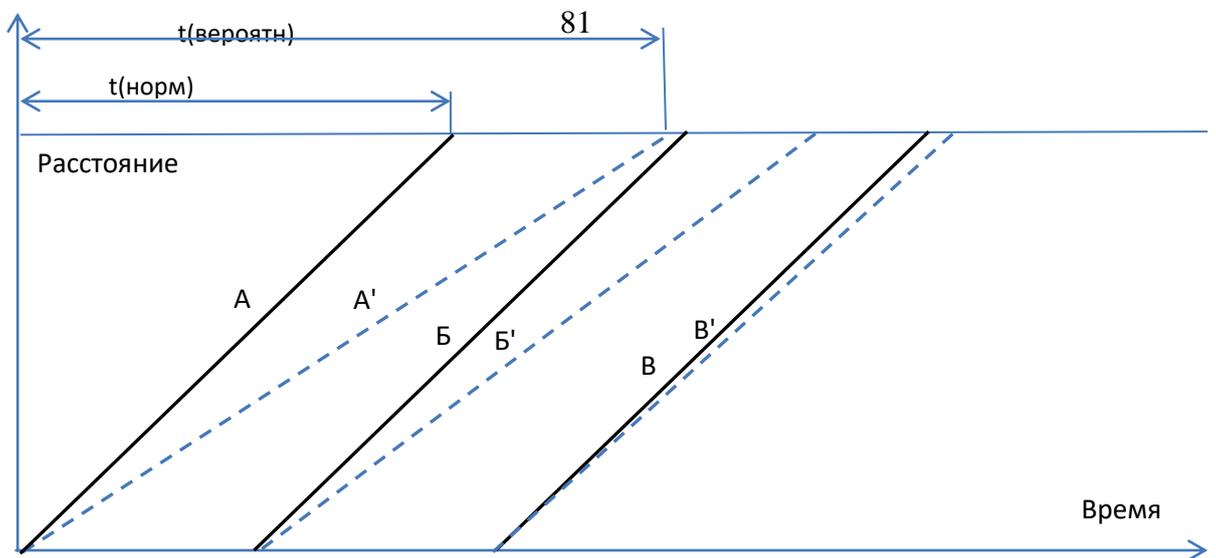


Рисунок 9 – Графическое изображение выполнения времени хода при максимальных интервалах

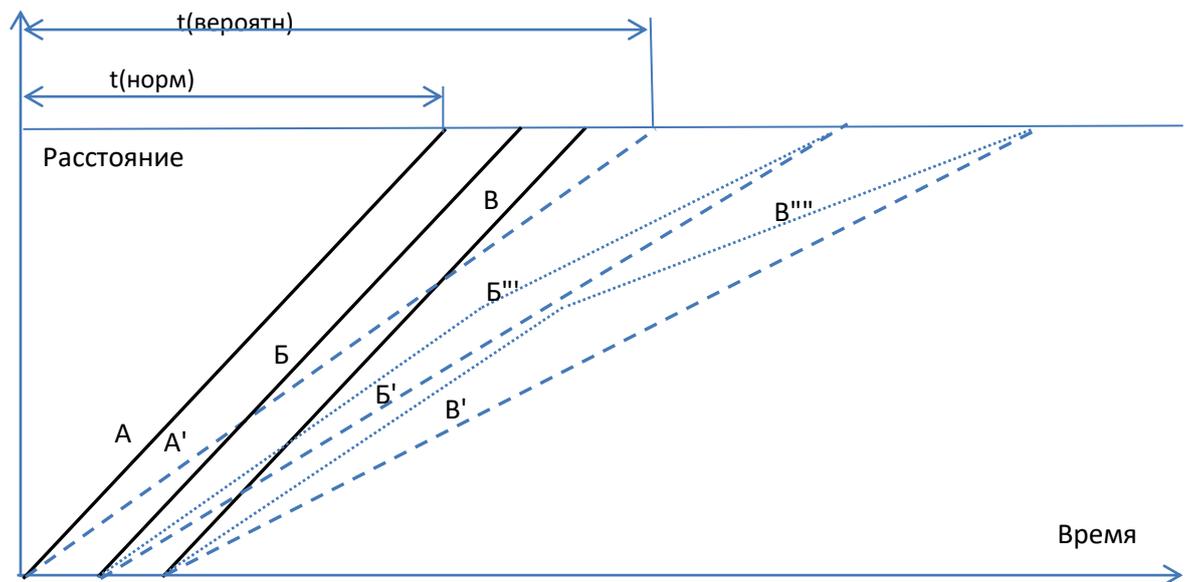


Рисунок 10 – Графическое изображение выполнения времени хода при минимальных интервалах

Характер влияния межпоездных интервалов на времена хода поездов в пакетах в заданных условиях, когда первый поезд следует свободно по всему диспетчерскому участку, при этом оказывая влияние на поезда, следующие за ним, представлены на графиках, построенных на основе математических ожиданий исследуемых величин для каждого поезда в пакете (рисунки 11 и 12).

а)



б)

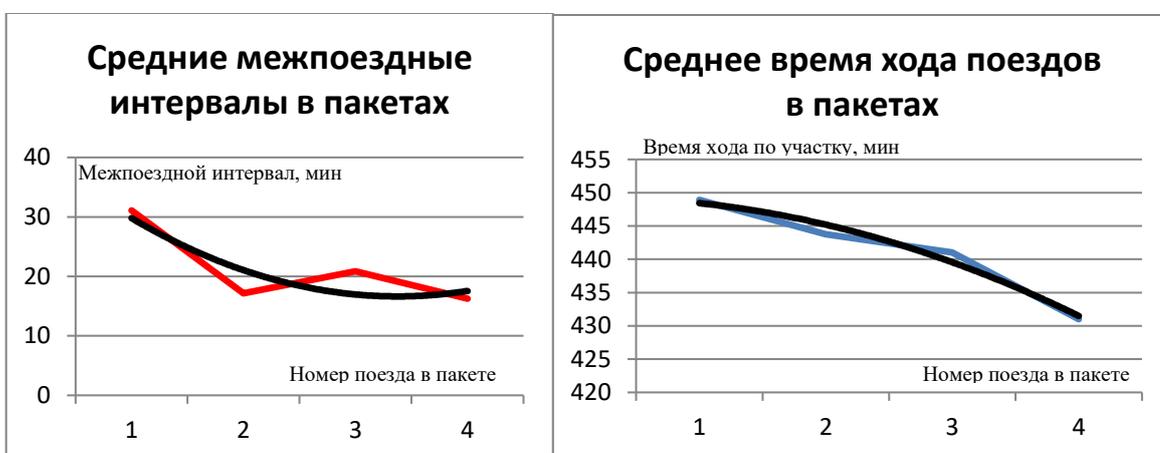


Рисунок 11 – Выполнение времени хода в зависимости от межпоездного интервала для поездов, следующими в пакете первыми, вторыми, третьими и далее для поездов четного направления: а) участок Облучье – Хабаровск

б) участок Хабаровск – Ружино

а)



б)

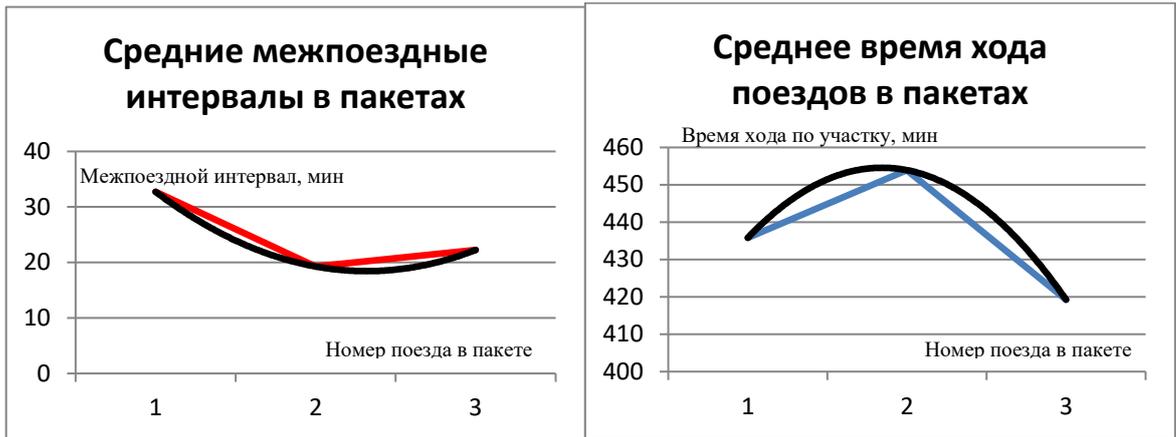


Рисунок 12 – Выполнение времени хода в зависимости от межпоездного интервала для поездов, следующими в пакете первыми, вторыми, третьими и далее для поездов нечетного направления: а) участок Хабаровск – Облучье
б) участок Ружино – Хабаровск

Пакетный график также является одним из возможных сценариев реализации графика движения поездов. Это вариант оперативного графика, широко используемого в период производства длительных закрытий, а также в случаях возникновения продолжительных отказов технических средств, сходов подвижного состава, размывов пути и других дестабилизирующих факторов. В случае организации движения пакетным графиком возрастает влияние каждого поезда в пакете на последующие поезда. Также, на времена хода поездов в пакетах оказывают влияние межпоездные интервалы при отправлении с технических станций. Корреляционный анализ данных обосновывает зависимость между данными элементами графика движения. Результаты проведенного анализа приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Корреляция между межпоездными интервалами по отправлению и итоговым участковым временем хода поездов

Участок	Позиция в пакете	
	2	3
Хабаровск-Облучье	-0,26	-0,23

3.4 Данные о выполнении межпоездных интервалов при организации движения виртуально-сцепленных поездов

Сдвоенный пропуск грузовых поездов служит эффективной мерой по уплотнению потока. До настоящего времени отсутствует однозначная оценка сравнительной эффективности соединенного вождения поездов – жесткого сцепления и пропуска пакета с укороченным межпоездным интервалом по технологии «виртуальная сцепка» [38, 84]. Основным преимуществом способа жесткого сцепления считают экономию нитки графика, что дает значительный выигрыш в периоды, когда требуется увеличить интенсивность потока. Технология сопряжена с необходимостью формирования поезда на удлинённых путях в течение 30-40 минутного интервала времени. Участковая скорость соединенного поезда, как правило, ниже нормативного значения. Эффективности рассматриваемой технологии в реальных эксплуатационных условиях, когда возникают отклонения в функционировании участка, удается добиться при наличии обводных путей или специальных путевых вставок. В противном случае, без правильной регулировки со стороны диспетчерского персонала, график движения дестабилизируется и для его восстановления требуется определенный период времени.

Технология соединения двух подвижных единиц в один виртуально-сцепленный поезд основана на использовании способа поддержания укороченного межпоездного интервала на основе точной координатной информации [13]. Стандартный режим последовательного отправления поездов исключает потери времени и расходы, необходимые для формирования жесткой сцепки, что является явным преимуществом технологии ВСЦ. Виртуальное сцепление также позволяет избежать проблемы выбора удлинённых путей, что требуется в технологии физического соединения.

Однако, при сложившихся технологиях пропуска и обработки поездов, состоянии инфраструктуры ожидаемого выигрыша – достижения высокого уровня эффективности пропуска по технологии ВСЦ в сравнении с жестко-

сцепленными поездами – не наблюдается [73]. В течение 2020 г. на участке Хабаровск II – Ружино Дальневосточной железной дороги проведено 137 пар ВСЦ поездов в четном направлении. В ходе работы проведено исследование по 37 парам. Критериями отбора выборки послужили интервалы по отправлению до 10 минут (включительно), проследование по всему участку без разъединения, а также отсутствие стоянок на промежуточных станциях вследствие производства работ по модернизации инфраструктуры в период длительных закрытий, обгона приоритетными поездами и отказов технических средств. Результаты наблюдений сведены в таблицу 8.

В первую очередь в ходе исследования изучены интервалы между ВСЦ поездами по отправлению с железнодорожной станции Хабаровск II и по прибытию на железнодорожную станцию Ружино. На рисунке 13 представлена сравнительная диаграмма интервалов между ВСЦ поездами. По оси абсцисс отображены минимальные межпоездные интервалы по отправлению и прибытию. По оси ординат – максимальные интервалы соответственно. Размер пузырька отображает средний интервал между ВСЦ поездами. Минимальный интервал по отправлению между ВСЦ поездами составляет 5 мин., аналогичный интервал наблюдается и по прибытию на следующую узловую станцию, где предусмотрена смена локомотивных бригад. Максимальный межпоездной интервал данной выборки составляет 10 мин. по отправлению и 30 мин. по прибытию. По данному параметру наблюдается резкое увеличение интервала.

Разница между максимальным и минимальным значением составляет 20 мин. Средний интервал по отправлению между ВСЦ поездами составляет 8 мин., по прибытию – 13 мин. Разница между средними значениями составляет 5 мин. в сторону увеличения. В ходе исследования установлено, что только в четырех случаях интервал между поездами снижен в течение поездки. Максимально интервал сокращен в сутках 30 декабря 2020 года с 9 мин. по отправлению до 5 мин. прибытию. Только в одном случае интервалы по отправлению и прибытию равны и составили 10 мин. В качестве промежуточного вывода можно отметить, что жестко-сцепленным поездам не свойственны подобные флуктуации

межпоездных интервалов, а средний интервал по прибытию между ВСЦ поездами не противоречит требованиям интервалов, предусмотренным для автоблокировки.

Таблица 8 – Сравнение межпоездных интервалов между ВСЦ поездами по отправлению и прибытию, проследовавших по участку Хабаровск II – Ружино (статистика 2020 г.)

№ пары	Интервал по отправлению	Интервал по прибытию	разница интервалов
1	0:05:00	0:13:00	0:08:00
2	0:08:00	0:30:00	0:22:00
3	0:09:00	0:07:00	снижение на 2 мин
4	0:09:00	0:13:00	0:04:00
5	0:08:00	0:11:00	0:03:00
6	0:08:00	0:09:00	0:01:00
7	0:09:00	0:11:00	0:02:00
8	0:10:00	0:10:00	выполнен
9	0:08:00	0:23:00	0:15:00
10	0:06:00	0:15:00	0:09:00
11	0:05:00	0:13:00	0:08:00
12	0:06:00	0:09:00	0:03:00
13	0:05:00	0:11:00	0:06:00
14	0:10:00	0:11:00	0:01:00
15	0:05:00	0:12:00	0:07:00
16	0:10:00	0:11:00	0:01:00
17	0:05:00	0:12:00	0:07:00
18	0:05:00	0:19:00	0:14:00
19	0:05:00	0:11:00	0:06:00
20	0:07:00	0:09:00	0:02:00
21	0:07:00	0:10:00	0:03:00
22	0:10:00	0:12:00	0:02:00
23	0:05:00	0:09:00	0:04:00
24	0:10:00	0:11:00	0:01:00
25	0:05:00	0:10:00	0:05:00
26	0:09:00	0:08:00	снижение на 1 мин
27	0:10:00	0:10:00	0:00:00
28	0:07:00	0:05:00	снижение на 2 мин
29	0:10:00	0:25:00	0:15:00
30	0:10:00	0:23:00	0:13:00
31	0:06:00	0:14:00	0:08:00
32	0:05:00	0:10:00	0:05:00
33	0:09:00	0:13:00	0:04:00
34	0:05:00	0:13:00	0:08:00
35	0:09:00	0:11:00	0:02:00
36	0:10:00	0:15:00	0:05:00
37	0:09:00	0:03:00	снижение на 6 мин

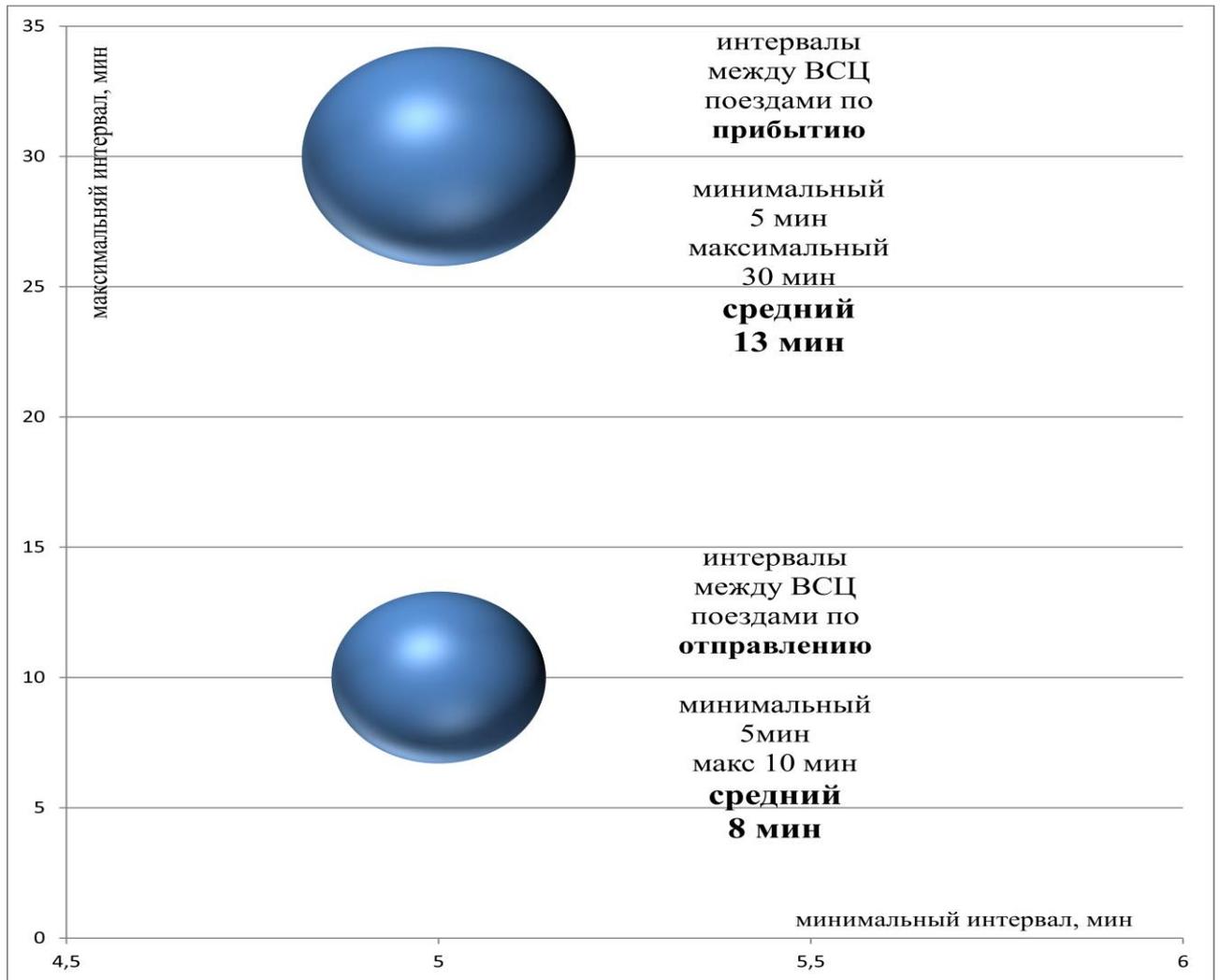


Рисунок 13 – Исследование интервалов между ВСЦ поездами на участке Хабаровск II – Ружино Дальневосточной железной дороги.

С целью повышения объективности приведенных расчетов следует отметить, что в пределах исследуемого участка движения ВСЦ поездов не все машинисты использовали рекуперативное торможение и предусмотренный режим автоведения, поэтому дополнительным способом повышения эффективности использования технологии виртуального сцепления является приведение локомотивного парка к номинальным значениям качественных характеристик, а также повышение квалификации машинистов ВСЦ поездов.

3.5 Модель размножения задержек в потоке поездов после сбоя в движении

Развитие инфраструктуры и интенсификация движения поездов привела к необходимости оценки влияния первичной задержки на поезда, движущиеся в плотном потоке. Распространение каскадных задержек напрямую влияет на эффективность оказания транспортной услуги. Рассматриваются модели распределения вторичных задержек. В большинстве случаев минимизация потерь от возникающих отказов технических средств и технологических нарушений происходит посредством диспетчерской регулировки. В условиях возникающих сбоев на инфраструктуре, от опыта, профессионализма и дальновидности диспетчера зависят такие показатели, как пунктуальность, энергоэффективность и участковая скорость.

В компании ОАО «РЖД» действует единый порядок учета количества задержанных поездов и времени их задержек по причине неисправностей технических средств, а также вследствие технологических нарушений. В настоящее время основным критерием учета является удаленность от возникшего инцидента.

Критерий удаленности для двухпутных и многопутных участков не учитывает основные характеристики потока – интенсивность и плотность. Данные элементы находятся в тесной зависимости друг от друга и связаны линейной формулой, подробно описанной в литературе:

$$n = \lambda * V \quad (13)$$

где n – интенсивность потока, поездов на единицу времени ($t_{\text{инт}}$), λ – плотность потока, поездов на единицу расстояния, V – участковая скорость.

Интенсивность потока также можно определить по формуле:

$$n = N/T \quad (14)$$

где N – количество отправленных поездов, T – время, за которое отправлены поезда.

Плотность также можно определить по формуле:

$$\lambda = \frac{N}{S} \quad (15)$$

где S – расстояние, на котором находится число поездов N , км.

Преобразуем формулу (13) для нахождения количества задержанных поездов по причине неисправностей технических средств, а также технологических нарушений:

$$\lambda = \frac{N}{S} = \frac{n}{V} = \frac{n \cdot T}{S} = \frac{n \cdot (t_{\text{норм}} + t_3)}{S} \quad (16)$$

где n – интенсивность отправления поездов с технической станции, начиная с первого задержанного поезда до момента возникновения инцидента, поездов/час, N – количество задержанных поездов, S – расстояние от технической станции до станции, следующей за местом возникновения инцидента, км, T – время следования поезда от технической станции до станции, следующей за местом возникновения инцидента, час. Данное время складывается из $t_{\text{норм}}$ – нормативного времени хода и t_3 – времени начальной задержки.

Таким образом, количество задержанных поездов по причине неисправностей технических средств, а также технологических нарушений определится по формуле:

$$N = n \cdot (t_{\text{норм}} + t_3) \quad (17)$$

Рассмотрим пример применения приведенной формулы (17). В сутках 8 октября 2019 в 10:35 мск. вр. допущен отказ технического средства в поезде № 1318 (1835 815 9700) на перегоне между железнодорожными станциями Кирга и Семисточный Дальневосточной железной дороги – «Тревога 2» по ответственности службы вагонного хозяйства.

Количество поездов, отправленных со станции Облучье, начиная с поезда №1318 до момента возникновения инцидента, составило 14 поездов четного направления. Поезд №1318 (1835 815 9700) отправлен в 7:34 мск. вр. Последний поезд до начала отказа отправился в 10:34 №2806 (8879 278 9861). Рассчитаем интенсивность потока по формуле (13):

$$n = 14 / (10:34 - 7:34) = 14 / 3 = 4,67 \text{ поездов/час}$$

Нормативное время ($t_{\text{норм}}$) прохождения грузового поезда от технической станции до станции Кирга (следующая станция за местом возникновения отказа) составляет 2 ч 36 мин или 2,6 ч. Время первоначальной задержки определим как разность фактического времени, затраченного на прохождение перегона Кирга – Семисточный (1 ч 4 мин) и нормативного времени хода по данному перегону (21 мин.) $t_3 = 1:04 - 0:21 = 0:43$ мин. (0,72 ч.)

Количество задержанных поездов по причине неисправностей технических средств, а также технологических нарушений определится по формуле (17):

$$N = 4,67 * (2,6 + 0,72) = 15,5 \text{ поездов}$$

Округлим данное число в большую сторону по правилам математики до целого числа и получим результат, что рассмотренный отказ привел к задержке 16 поездов по ответственности службы вагонного хозяйства. Согласно действующему учету, задержано по ответственности службы вагонного хозяйства только 11 поездов, остальные поезда принимаются к учету за дирекцией управления движением.

Предлагаемая методика позволяет реализовать следующие задачи:

- оперативное прогнозирование ситуации в случаях возникающих сбоев на инфраструктуре; зная примерную продолжительность инцидента, возможно просчитать количество поездов, которое будет задержано и, исходя из расчета, определить момент времени дальнейшего отправления поездов с технической станции;

- адекватный статистический учет количества поездов, задержанных по ответственности подразделения, из-за которого возник отказ в работе технических средств или технологическое нарушение;

- реализация возможностей по нахождению узких мест в работе инфраструктурного комплекса, локомотивного и вагонного подразделений, а также диспетчерских центров.

Кроме того, предложенный алгоритм позволит повысить эффективность работы программных комплексов, предназначенных для учета и расследования

неисправностей технических средств, а также технологических нарушений. Графическая модель элементов расчета изображена на рисунке 14.

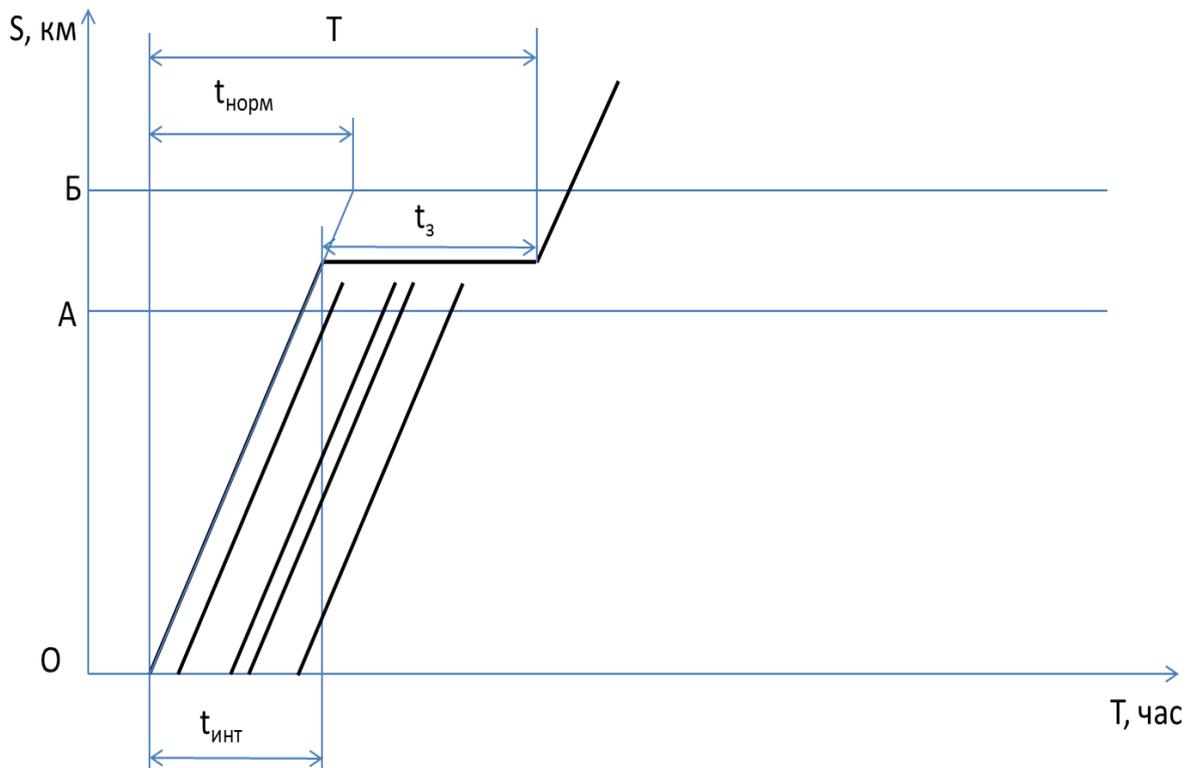


Рисунок 14 – Графическая модель расчета количества поездов, задержанных вследствие инцидента

Результаты по третьей главе

1. Проведенные исследования показали, что использование технологии сдваивания грузовых поездов не позволяют преодолеть основной проблемы, возникающей при пропуске интенсивного потока, – снижения скорости его продвижения. Это вызвано эффектом взаимовлияния поездов, который усиливается по мере сокращения межпоездного интервала. При существующей интенсивности грузового движения на магистральных двухпутных линиях, превышающей 60-70 пар поездов в сутки, снижение участковой скорости составляет 20 проц. и более.

2. Вместе с тем, использование технологий сдваивания позволяет повысить число пропускаемых поездов в пиковые периоды, в частности, при реализации многочасовых «окон». При этом необходимо обосновывать использование технологии ВСЦ, жесткой сцепки или объединения контейнерных поездов с учетом конкретной ситуации, с оценкой технико-экономического эффекта. Определение условий применения методов сдваивания поездов в зависимости от эксплуатационной обстановки приведет к повышению пропускной способности, совершенствованию энергетической эффективности организации движения и, как результат, комплексному экономическому росту операционной деятельности компании ОАО «РЖД»

3. Исследования показывают, что при существующем уровне организации движения и состояния инфраструктуры не следует ожидать роста степени использования пропускной способности, пропорционального повышению плотности потока поездов. Оценочный расчет, основанный на результатах настоящей работы, показывает, что при двукратном уменьшении межпоездного интервала в каждой паре ВСЦ (до 6 мин.) использование пропускной способности увеличится, в лучшем случае, на 10 проц. Использование технологии ВСЦ позволяет повысить степень использования автоведения и системы информирования машинистов, что является неоспоримым преимуществом в вопросах выполнения расписания следования и эксплуатационных показателей.

Кроме того, организация движения ВСЦ поездов применима для ускоренного пропуска грузовых поездов перед плановым длительным закрытием одного из путей двухпутного перегона.

4. В настоящей главе изложены основные доводы по формированию многопоездной модели графика движения поездов в условиях суточной неравномерности поездопотока, а также обоснование взаимной зависимости основных элементов графика движения поездов – межпоездных интервалов и времен хода. Первичный анализ исторических данных показал наличие корреляционной зависимости при условии формирования пакетного графика.

5. Исследования показывают, что уменьшение межпоездных интервалов по отправлению с начальной станции в условиях следования в плотном потоке, в конечном счете, ведет к увеличению интервалов на выходе с участка, в том числе, при организации движения виртуально-сцепленных поездов. Таким образом, повышение качества разработки графика движения в условиях повышения плотности потока требует учета вышеуказанных доводов. Разработка графика движения требует детального математического анализа поведения потока в целом для каждого отдельного диспетчерского участка, а не отдельно взятого поезда.

6. Комплексное применение технологий организации ВСЦ поездов, жестко-сцепленных поездов и объединения контейнерных поездов с использованием алгоритмов вероятностного прогнозирования при формировании нормативных или вариантных графиков в зависимости от условий эксплуатационной обстановки и поставленных директивных задач позволяет перейти к точности прибытия поездов грузового вида движения на узловые станции, исключив необоснованное накопление поездов на полигонах дорог.

4 ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОВОГО ДВИЖЕНИЯ

4.1 Оценка энергопотребления одиночно следующих поездов с различными скоростными характеристиками

Проведено исследование расхода электроэнергии для поездов, следовавших по направлению главного хода Хабаровск II – Облучье без неграфиковых остановок. В ходе исследования проведен анализ расхода электроэнергии для двух групп поездов:

а) поезда, проследовавшие по изучаемому участку по времени, установленному нормативным (сводным) графиком движения (+/- 3 минуты). Назовем данную группу быстрыми поездами.

б) поезда, проследовавшие по участку по времени, близкому к среднему значению для всей выборки поездов (+/- 3 минуты). Назовем данную группу медленными поездами.

Оценка проведена для поездов обоих направлений. Данные по средним выборочным значениям по абсолютному и удельному показателям расхода электроэнергии для медленных и быстрых поездов нечетного и четного направлений сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Данные по расходу электроэнергии для поездов, свободно следующих по направлению главного хода Хабаровск II – Облучье

	Нечетные поезда		Четные поезда	
	медленные	быстрые	медленные	быстрые
Абсолютный расход, кВт*ч.	14080	12720	11224	11091
Удельный расход, кВт*ч.	0,019	0,016	0,005	0,005

На рисунках 15 и 16 представлены точечные графики распределений по абсолютному расходу электроэнергии для быстрых и медленных поездов.

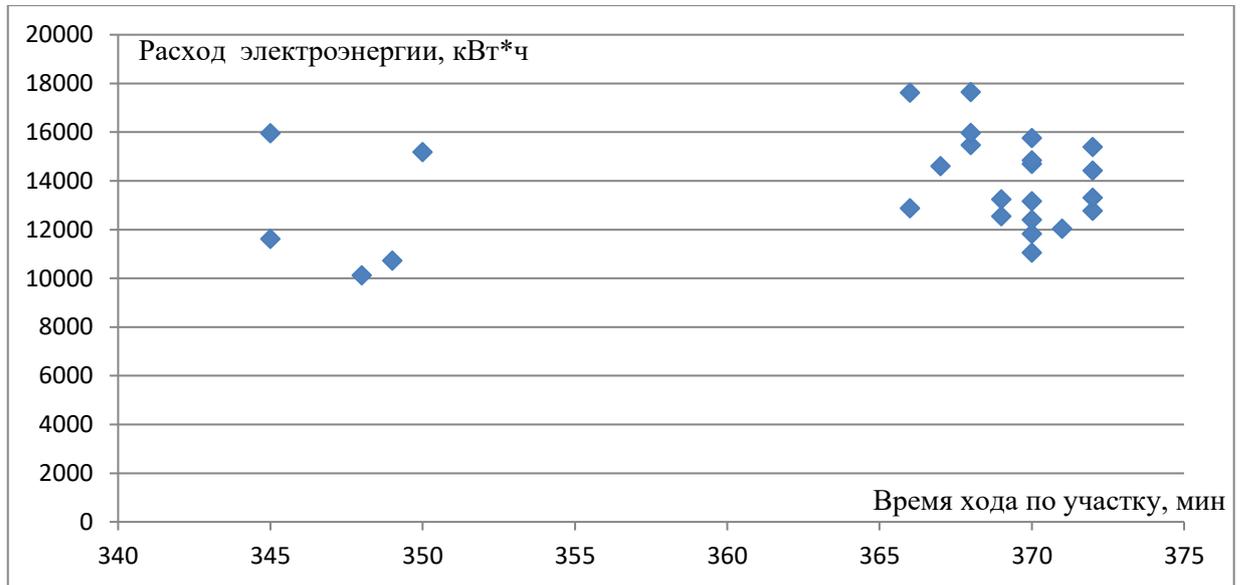


Рисунок 15 – Соотношение времени хода и абсолютного расхода электроэнергии для медленных и быстрых поездов нечетного направления (данные за январь 2018)

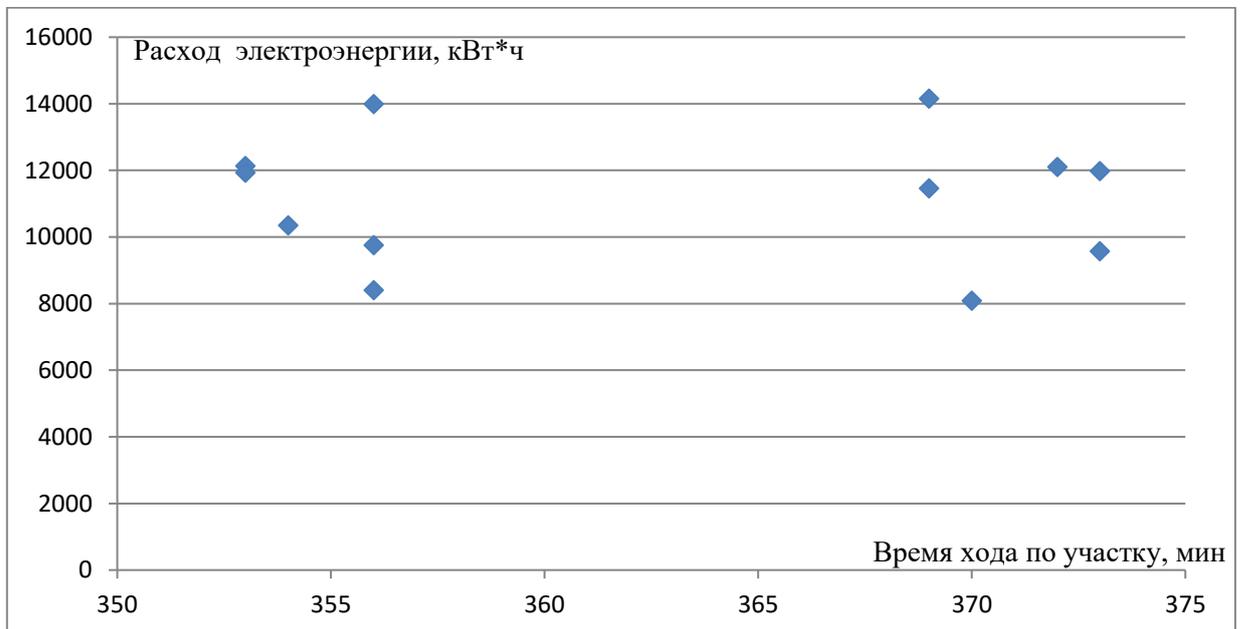


Рисунок 16 – Соотношение времени хода и абсолютного расхода электроэнергии для медленных и быстрых поездов четного направления (данный за январь 2018)

4.2 Оценка энергопотребления жестко- и виртуально-сцепленных поездов

Проведен сравнительный анализ потребления электроэнергии на тягу по группам виртуально- и жестко-сцепленных поездов. Данные о расходе энергии при проследовании контрольного участка снимались с локомотивных счетчиков. В таблице 10 представлены данные по минимальному, максимальному, среднему потреблению энергии ведущим и ведомым поездами в парах виртуально- и жестко-сцепленных поездов.

Таблица 10 – Объем энергопотребления поездами в парах ВСЦ и жестко-сцепленных поездов (кВт*ч)

Расход	ВСЦ		Жесткая сцепка	
	Ведущий	Ведомый	Ведущий	Ведомый
Минимальный	9095	8705	17065	3402
Максимальный	19856	21529	27158	14689
Средний	16284	16203	23193	9097

Из рассмотрения данных следует, что отличие в расходе энергии ведущим и ведомым локомотивами в виртуальной сцепке мало. В то же время, потребление локомотивами жестко-сцепленных поездов различается в два-три раза, основная нагрузка приходится на ведущий компонент. Это отражает наличие рассогласования кривых тяги при следовании поезда на сложном профиле пути. Указанный эффект некоторые авторы считают причиной недопустимо большой нагрузки на контактную сеть, которую оказывает жестко-сцепленный поезд. Это утверждение не обоснованно, так как расстояние между точками токосъема (около 1 км.) значительно меньше длины межподстанционной зоны (для системы тяги переменного тока – 30-40 км.). Соответственно, режим работы фидеров тяговых подстанций, питающих зону, в случае жесткой сцепки не имеет никаких особенностей.

Обнаружено, что расходование энергии жестко-сцепленными поездами при безостановочном движении существенно выше аналогичного показателя для ВСЦ

поездов. Это объясняется отсутствием рекуперативного возврата электроэнергии при пропуске поезда с физическим соединением. При движении в плотном потоке аналогичный параметр у жестко-сцепленных поездов несколько ниже, чем при организации пропуска ВСЦ поездов. Причиной этому являются потери скорости и, как следствие, кинетической энергии перед подъемами. Этот эффект усиливается при движении поездов на горном участке.

Данные по суммарному энергопотреблению сдвоенными поездами представлены в таблице 11. Как видно, потребление парами ВСЦ поездов на 0,4 проц. выше (в среднем), чем жестко-сцепленных поездов. Интенсивное использование технологии последнего типа в периоды пиковой нагрузки приведет к экономии энергии, расходуемой на тягу поездов.

Таблица 11 – Суммарное потребление энергии пакетом ВСЦ и жестко-сцепленных поездов (кВт*ч)

Расход	ВСЦ	Жесткая сцепка
Минимальный	22073	26055
Максимальный	39734	41008
Средний	32430	32304

Следует отметить, что существенное влияние на показатели энергопотребления, приведенные в таблицах 10 и 11, оказали такие факторы как действующие недостатки в организации движения поездов в интенсивном потоке (замедление потока перед входными и проходными сигналами станции, враждебные маршруты при организации маневровой работы и т.д.), недостаточный уровень использования автоведения и рекуперативного торможения, а также отклонения от норм содержания наличного локомотивного парка.

4.3 Базовые эксперименты по пропуску сдвоенных поездов

С целью определения опорных показателей, характеризующих движение виртуально- и жестко-сцепленных поездов, выполнена серия экспериментальных поездок на Дальневосточной железной дороге (март 2021 г.). В процессе натуральных испытаний пропускались пакеты из двух однотипных тяжеловесных (норма – 6300 т.) поездов по участку Хабаровск II – Ружино. В первой серии движение осуществлялось в стандартном режиме одиночного пропуска (режим ОП), поезда отправлялись по ниткам нормативного графика. Вторая серия поездок реализовывалась с использованием жесткого сцепления (режим ЖСЦ), третья – с использованием ВСЦ. Отправление пакетов производилось по «зеленой улице» – с интервалом более 15 мин. после предшествующих поездов.

Идентичные условия движения обеспечивались путем отправления пакетов в фиксированное время суток и использования одних и тех же локомотивных единиц. За экспериментальными поездами были закреплены локомотивы серии ЗЭС5К с номерами 197 и 268, которые в процессе выполнения поездок выполняли функции соответственно ведущего и ведомого тяговых средств. Машинистам предписывалось в процессе движения максимально использовать автоведение – режим УСАВП при стандартном следовании и режим ИСАВП – при движении в составе сцепки.

Данные об энергопотреблении при движении сдвоенных поездов приведены в таблице 12. В последнем столбце указан эквивалентный расход энергии – с учетом рекуперации. Возврат энергии в систему при пропуске жестко-сцепленных поездов отсутствует, так как при этом режиме не используют рекуперативное торможение.

Таблица 12 – Данные по расходу электроэнергии на тягу поездов (кВт*ч)

Режим пропуска	Позиция локомотива	Расход	Возврат (рекуперация)	Эквивалентный расход
ОП	ведущий	19079	2754	35555
	ведомый	22523	3293	
ЖСЦ	ведущий	26288	-	43560
	ведомый	17272	-	
ВСЦ	ведущий	19212	1850	35942
	ведомый	20758	2178	

Как видно из приведенных данных, в указанных поездках по технологии ВСЦ не получен выигрыш по сравнению с поездами, пропущенными в одиночном режиме. Однако наблюдается значительная экономия энергии по сравнению с жесткой сцепкой – порядка 17 проц. В базовых поездках выполнялось требование пропуска сдвоенных поездов «по зеленой улице». Соответственно, наблюдались улучшенные показатели участковой скорости. Для ВСЦ поездов эта величина составила 51,3 км/ч, для жестко-сцепленных – 53,1 км/ч. Это подтверждает ранее высказанное предположение, что случайные флюктуации условий пропуска оказывают на жесткую сцепку более слабое влияние. Отметим, что показатель движения всех спаренных поездов все же ниже показателя участковой скорости, заложенной в нормативный график (61 км/ч).

Результаты по четвертой главе

1. Анализируя данные таблицы 9 (*одиночное следование поездов*), можно сделать вывод, что увеличение времени хода, согласно статистическим данным, приводит к увеличению абсолютного расхода энергии. При этом время хода не оказывает существенного влияния на удельный расход, учитывающий массу поезда. Анализируя представленные графики, можно сделать еще два существенных заключения. Во-первых, отсутствует зависимость между временем хода и расходом электроэнергии. В нечетном направлении время хода по участку, установленное графиком движения, составляет 348 минут. В четном направлении – 353 минуты. Среднее время хода для поездов нечетного направления составляет 369 минут, для четных поездов – 371 минута. При этом, как в четном, так и в нечетном направлениях, разброс данных по расходу электроэнергии для быстрых и медленных поездов находится в одинаковых пределах. Во-вторых, при одинаковых временах хода сильно разбросаны данные по энергопотреблению. Акцентируя внимание на том, что поезда отобраны таким образом, что отсутствуют внешние воздействия (от впереди идущих поездов, задержек, связанных с «окнами», неисправностями и т.д.), можно утверждать, что разброс данных связан с внутренними воздействиями, связанными с выбором режима вождения, классификацией и опытом машинистов.

2. Анализируя данные таблиц 10 и 11, а также принимая во внимание результаты экспериментальных поездок, целесообразно сделать вывод, заключающийся в том, что организация пропуска ВСЦ поездов принесет значительную экономию электроэнергии в случае «свободного» следования (в случае отсутствия влияния инфраструктурных предупреждений и неграфиковых остановок в пути следования). В текущих условиях состояния инфраструктуры, наличия «барьерных» мест, технологических особенностей работы технических станции, организация пропуска жестко-сцепленных поездов ведет к более рациональному использованию электроэнергии, ниток графика, путей приема и технических средств решающих станций;

3. Для Дальневосточной железной дороги организация движения ВСЦ поездов показывает наибольшую эффективность в нечетном направлении от станции Хабаровск II. Данное направление характеризуется форсированным пропуском поездов в направлении междорожного стыка Архара. Неоднократно показатели сдачи на данный стык составляли 85-90 поездов, в том числе посредством сокращения межпоездного интервала благодаря технологии виртуального сцепления поездов нечетного направления. Увеличение пропускной способности для данного направления дополняется значительной экономией энергетических ресурсов (по данным топливно-энергетического центра Дальневосточной железной дороги экономия удельного расхода электроэнергии в октябре 2021 г. составила более 10 кВт*ч/10 тыс. ткмбр при организации движения ВСЦ поездов);

4. В условиях пропуска интенсивного потока поездов существенной экономии топливно-энергетического ресурса можно добиться путем перехода на более высокий уровень надежности подвижного состава, инфраструктуры, а также использования гибких алгоритмов управления движением – с учетом специфики пропуска сдвоенных поездов;

5. Исследования показывают, что экономия электроэнергии от использования перспективной технологии организации движения виртуально-сцепленных поездов может быть увеличена путем реализации комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на совершенствование имеющихся технических средств, инфраструктуры, технологических процессов по обработке поездов на станциях, исключения барьерных мест. В частности, организация движения ВСЦ поездов на удлиненных плечах обслуживания локомотивных бригад, синхронизация межпоездных интервалов между ВСЦ поездами на участках, имеющих ограничения скорости, обеспечение возможности приема ВСЦ поездов на один путь технической станции.

5 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ ГРАФИКА ИСПОЛНЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ПУНКТУАЛЬНОСТИ

5.1 Исходные положения к разработке экономического показателя оценки графика исполненного движения

График движения поездов несет на себе технологическую функцию синхронизации всех процессов на железной дороге, и в то же время служит средством реализации коммерческого потенциала перевозок. Момент прибытия поезда в пункт назначения служит временным ориентиром, который позволяет выстраивать эффективные планы деятельности персоны или организации. На примере компании ОАО «РЖД», средний размер дополнительной платы за следование маршрута по разработанному графику от порта Находка Дальневосточной железной дороги до станций Московской железной дороги составляет 72 тыс. рублей. В 2019 г. с портов Дальнего Востока было отправлено 784 поезда на специальных условиях строгого графика. Потенциально эта цифра может быть гораздо значительнее. Всего дальневосточными станциями зарождения вагонопотока в прошлом году сформировано приблизительно 23 400 поездов. Таким образом, только 3,4 проц. всего поездопотока приносит дополнительный доход за продажу ниток графика движения.

Качество функционирования транспортной компании оценивается, в первую очередь, с точки зрения удовлетворения запросов пользователей услугой. С другой стороны, используются экономические механизмы и критерии, которые служат для выстраивания эффективного технологического процесса перевозок.

Экономической целью компании – железнодорожного перевозчика является максимизация прибыли. Это достигается путем увеличения доходной части (регулирования цен, стимулирования спроса на услуги, повышения качества обслуживания) и путем улучшения эффективности применения существующей инфраструктуры и подвижного состава – сокращение затрат на перевозки.

Характер перевозочного процесса в секторах пассажирских и грузовых перевозок различен, поэтому имеется расхождение в подходах к оцениванию их качества.

В традиционной экономической парадигме полагают, что прибыль компании растет с увеличением объема перевозок. Такой характер изменения экономического показателя сохраняется при малой интенсивности движения поездов. В условиях большой загруженности инфраструктуры возникают многочисленные отклонения от нормального хода технологического процесса, что ведет к появлению дополнительных эксплуатационных затрат и штрафов. Это приводит к нарушению указанной выше закономерности. Снижение пунктуальности движения ведет к тому, что часть пассажиропотока и грузопотока уходит на конкурирующие виды транспорта, в первую очередь, на автоперевозки.

Оперативное управление движением поездов на участке железной дороги предполагает выполнение регулировочных действий, направленных на оптимальное использование ресурсов, в том числе временных (заполнение пространства графика движения). Решения по каждой из регулировок осуществляется диспетчерским персоналом. Критерием при решении конкретной оптимизационной задачи служит экономический результат, который, по своей сути, является точечной оценкой деятельности компании-перевозчика.

Полагают, что основным критерием оценки качества процесса пропуска поезда по участкам и обработки на станциях служит скорость выполнения операций. Такой подход при использовании в грузовом сегменте дает малоэффективные решения по ликвидации задержек поездов и профилактике негативного развития ситуации. В ряде реальных случаев использование исключительно временного (скоростного) критерия ведет к ухудшению экономического результата. Так, в периоды временного спада интенсивности потока поездов, а следовательно, уровня взаимного влияния поездов, попытка показать «яркий» скоростной результат (со стороны диспетчера или машиниста) приводит к перерасходу топливно-энергетического ресурса, к экономическим потерям.

Моделирование экономической среды большого полигона, построение прогноза с целью обоснования оперативных регулировок трудоемко и малоэффективно. Причиной служит слабая предсказуемость поведения сложного человеко-машинного комплекса. Более продуктивным является поиск совокупности локальных оптимумов по отдельным элементам системы (поездам, участкам) с обязательным учетом последствий (для всего полигона) производства каждого из регулировочных действий.

Рассматривая область использования экономических критериев в задачах оптимизации процессов на железной дороге, можно выделить два направления. Первое эффективно в области интенсивного пассажирского движения, в котором возникают регулярные микро-отклонения от графика. Нередко используется подход, в соответствии с которым каждой задержке поезда сопоставляется дополнительный расход денежного ресурса. Второе направление исследует экономический результат выполнения грузовых перевозок в макро-масштабе – масштабе железнодорожной сети. При этом анализируется баланс доходов и расходов перевозчика. Разработок в области микроэкономики грузового движения неоправданно мало.

Обширный круг работ по проблеме оперативного управления движением в основной своей части ориентирован на интенсивное пассажирское движение, которое развито в странах Европы и в других регионах мира с высокой плотностью населения. При поиске оптимальных управленческих решений в качестве основного критерия, как правило, используется время опозданий одного или группы поездов относительно нормативного расписания. При этом предполагается, что востребованность железнодорожного транспорта и, соответственно, его прибыльность напрямую зависят от показателя пунктуальности.

Некоторые авторы, понимая ограниченность такого подхода, пытаются ввести определенные ценовые показатели, которые отражают удовлетворенность пассажиров в перевозках и могут служить критериями для решения

оптимизационных задач. При этом достаточно обоснованной экономической модели пассажирской перевозки до сих пор нет.

Экономический эффект формируется не только в локальном (по времени и по пространству) процессе движения поездов. Рациональный пропуск потока по данному участку позитивно сказывается и на отдаленных результатах – экономии затрат на соседних участках и направлении в целом. Поэтому в обобщенную модель формирования экономического результата от продвижения грузового поезда по рассматриваемому участку закладываются как расходы, понесенные перевозчиком до расчетного момента, так и затраты, которые прогнозируются на оставшейся части его маршрута.

В ходе поиска регулировочных решений по организации пропуска потока грузовых поездов ставится и находится решение оптимизационной задачи. Одним из ключевых элементов хода принятия диспетчерского решения является критерий поиска оптимальных решений – пока не разработан. Установление корректного экономического измерителя позволит усовершенствовать качество оперативного управления перевозок в грузовом сегменте, а также уровень прибыли деятельности компании-перевозчика.

В ОАО «РЖД» приняты 4 базовых измерителя эксплуатационной деятельности диспетчерского центра управления перевозками по организации пропуска грузопотока: участковая скорость, средний вес поезда, размер грузооборота и производительность локомотива. Действующие измерители введены в работу транспортной отрасли железнодорожного транспорта в 20-е годы прошлого столетия (В 1927 г. XXIII съезд представителей службы эксплуатации утвердил измерители «Оборот вагона», «Среднесуточный пробег вагона», «Участковая скорость» как наиболее удобные, простые и достаточно наглядные).

В современной системе, при определении бюджетного показателя «участковая скорость», в некоторых случаях допускаются ошибки. В традиционном, стандартном понимании [29], нахождение состава на промежуточной станции попадает в расчет «участковой скорости» и занижает

суммарный результат по данному показателю. В текущих условиях автоматизированного определения, период при нахождении состава грузового поезда на промежуточной станции может не оказывать влияние на «участковую скорость», если осуществляется операция технического характера на этой станции (например, смена локомотива или локомотивной бригады). Существенную неопределенность в расчет измерителя «участковой скорости» вносит также оценка времени по прибытию и отправлению по данным программного комплекса ГИД УРАЛ «ВНИИЖТ». Эти моменты устанавливаются по перекрытию входных и выходных сигнальных точек, что противоречит требованию фиксации пересечения условной оси поезда с осью поста электрической централизации, либо осью пассажирского здания. Кроме того, в учет попадают искаженные данные о прибытии и отправлении поездов при смене нумерации грузовому поезду, также при объединении грузовых поездов и, следовательно, при их разъединении.

Наиболее обоснованным и корректным считается расчет показателя участковой скорости на основании итоговых данных, полученных непосредственно из маршрутов машинистов, а не из информационных систем текущего учета. В ходе проведения оценки скорости влияние оказывает человеческий фактор, а именно, влияние машиниста и техника-расшифровщика данных скоростемерных кассет (лент). Машинист действительно может не правильно отобразить присвоенный номер поезда, указав в отчетных документах тот, который не идет в расчет бюджетных показателей, или время проведения технических операций для данного поезда. Нельзя убрать из системы учета влияние человеческого фактора со стороны дежурно-диспетчерского персонала. На практике встречаются случаи ошибочного присвоения номера грузового поезда рабочему поезду, следующему со значительным скоростным ограничением; при этом искажается итоговая статистика. Анализ показателей официальной отчетности информационных систем определения и учета, используемых в компании ОАО «Российские железные дороги»: Ц0-1, Д0-10ВЦ, ЦОММ, ГИД УРАЛ «ВНИИЖТ», ТЭП – иллюстрирует, что несоответствия по

измерителю «участковая скорость» достигают 10 проц. На текущий момент, данная погрешность имеет допустимый предел и учитывается в аналитических справках. Одной из основных причин расхождения данных является отличие механизмов учета простоя поездов в многопарковых станционных системах. Приведенные несоответствия приводят к некорректному расчету измерителя участковой скорости, не позволяет объективно оценить работу диспетчерского аппарата.

Определение бюджетного показателя «средний вес грузового поезда» также имеет ряд методических ошибок. Определение данного измерителя решающим образом зависит от присвоенного номера поезда вида движения. В качестве примера, согласно алгоритму [50] присвоения нумерации, состав в количестве 10 вагонов допускается формировать, сопровождая его номером одиночно-следующего локомотива. Поэтому, данное грузовое формирование можно при учете отнести как на резервный вид движения, так и на грузовой. Величина измерителя в обоих случаях будет отличаться. Также, немаловажные погрешности учета вызывает некорректное использование данных о спаренных поездах. В учет данные поезда могут не попадать по субъективным причинам, в частности, из-за отсутствия достаточного количества нормативных ниток в графике движения. В систему итогового учета данные о проследовании спаренных поездов могут не попасть вследствие ошибок локомотивных бригад, связанных с неправильным оформлением маршрутных листов.

Измеритель «производительность локомотива» также имеет достаточно усредненный характер, что делает его малоэффективным в процессе оперативной организации движения. Достаточно сказать, что при его формировании не проводится дифференциация в зависимости от иных показателей, таких как участковая скорость и средний вес грузового поезда.

Фундаментальным экономическим измерителем должен служить размер тонно-километровой работы (грузооборота). При этом, эффективность этого измерителя в стандартном понимании низка, так как отсутствует учет уровня прибыльности различных категорий поездов. Кроме того, стремление

усовершенствовать выполнение этого показателя приводит к многочисленным отклонениям от графика грузовых поездов, что, в конечном счете, снижает экономический выигрыш из-за выплаты штрафов (пени) за нарушение сроков доставки.

Принципиальным минусом существующей системы учета можно считать значительное отставание моментов получения бюджетных показателей от реальных процессов. Это служит существенным препятствием их использования при принятии тактических управленческих решений. Кроме того, в используемых показателях слабо прослеживается влияние на конечный экономический результат эксплуатационной работы, что затрудняет их применение в непосредственной деятельности диспетчерского персонала.

5.2 Методы оценки качества исполненного движения на основе выполнения сроков доставки

Анализ литературы в области транспортной экономики показывает, что вопросы использования ценовых методов и критериев в оперативном диспетчерском управлении разработаны недостаточно. В сложившейся практике управления грузовым сегментом подход, использующий экономические ориентиры, заменяют работой по частным технологическим показателям: участковой скорости движения потока, среднему весу поезда и др. [68, 69] Нередко такой "инструментальный" подход препятствует действиям, направленным на получение максимально возможной прибыли.

Сегодня появляется необходимость, и имеется возможность напрямую ввести показатель прибыли в оперативное управление движением [70]. Это станет реальным, если установить четкий экономический критерий на микроуровне управления, придать в помощь диспетчеру средство интеллектуальной поддержки – систему СППР.

Теория оптимального управления движением поездов, в которой локальные процессы на участке дороги и отдаленные их последствия, рассматриваются с позиции экономиста, пока не разработана. Опубликован ряд работ (в частности, [17, 26, 79, 83, 103]), в которых лишь намечены контуры микроэкономического подхода к решению задач оперативного управления. В качестве примера можно привести детальный анализ накопления расходов при переработке вагонов [34], позволяющий ввести в оптимизационную задачу экономический критерий оценки качества управления станционными процессами в реальном времени. Для определения расходной части баланса используется процессно-функциональный подход, предполагающий учет фактических затрат при выполнении каждой операции.

В работе [91] оценивается современное состояние системы управления движением поездов. В качестве реальных факторов, которые вызывают риски экономических потерь, признаются сверхнормативный уровень технических

отказов, низкое качество планирования перевозочного процесса и слабая дисциплина при организации и проведении ремонтных работ. Основными препятствиями на пути совершенствования управления являются:

– отсутствие сквозной экономической модели, необходимой для оценивания ответственности и вклада различных звеньев в формирование конечного результата;

– отсутствие сбалансированной системы показателей, консолидирующей производственные задачи организаторов перевозочного процесса и инфраструктурных подразделений компании-перевозчика.

Одной из первых работ, в которой предложено использовать экономическую оценку при определении приоритетности пропуска поездов в конфликтной ситуации, является статья [1]. Интегральная (дедуктивная) оценка определяется экспертным путем на основе фактического материала, полученного с реально функционирующей дороги. В указанной работе отсутствует четкая, практически полезная методология определения очередности следования грузовых поездов.

В концептуальной модели железнодорожных грузовых перевозок [94] повышение доходности рассматривается как проблема оперативного уровня управления. Полагается, что заказы отправителей должны приводиться в соответствие доступной пропускной способности транспортной системы. Механизмы, с помощью которых удовлетворяется спрос на услугу, функционируют на тактическом уровне управления. Основным из них является график движения поездов. Методология совместного анализа запросов на транспортную услугу и движения вагонов разрабатывается в трудах E. Kraft [93]. Известные модели формирования экономического результата и оптимизационные механизмы могут получить практическое применение, если налажена гибкая (адаптивная) технология управления движением поездов.

Критерии оптимальности процессов пропуска пассажирских и грузовых поездов различны. Качество следования пассажирского поезда определяют по степени приближения фактического расписания – остановочных интервалов

посадки/высадки пассажиров – к нормативному (графиковому) расписанию. Оценкой пассажирского сегмента графика движения в большинстве работ служит показатель «уровень надежности графика».

В грузовом движении точность проследования поездами отдельных пунктов имеет смысл, отличный от точности соблюдения интервалов посадки/высадки пассажиров. Грузовой график содержит весьма ограниченное число точек, необходимых для развязки (предотвращения конфликтов) между парами поездов. Траектории движения поездов между этими точками могут выбираться различными способами. Имеющаяся степень свободы, в принципе, позволяет оптимизировать скоростной режим следования каждого из поездов.

Проблемы обеспечения оптимального диспетчерского управления с использованием экономических критериев имеют много общего во всех видах транспортных систем. К примеру, в статье [35] рассмотрена оценка работы смежного вида транспорта (водного транспорта) с точки зрения создания единого критерия при планировании и обосновании типов судов. В условиях рыночных отношений усложняются возможности оптимизации грузопотоков, которые, при действующей ранее плановой экономике, решались органами ведомственного и государственного управления в установленном централизованном порядке. Соответственно, существенно возрастают объёмы встречных, порожних и других нерациональных пробегов, ухудшается производительность работы подвижного состава и завышается себестоимость перевозок грузов. Схожие проблемы испытывает отрасль железнодорожного транспорта в Российской Федерации. Авторами статьи предлагается обосновать выбор флота для стратегического планирования, основываясь на оценке экономической эффективности. В свою очередь, для оценки экономической эффективности необходим показатель некоей суточной доходности или прибыльности использования типа судна при выполнении какого-либо рейса. Экономический критерий является наиболее показательным, исключает абстрактные формы измерений, учитывает большинство факторов, влияющих на эффективность использования любой транспортной отрасли.

В статье [45] рассматриваются факторы, влияющие на общую эффективность транспортно-логистической цепи. Рассмотрены ключевые показатели эффективности при организации перевозок, в том числе мультимодальных перевозок, с учетом интересов всех участников перевозочного процесса. Установлены основные параметры, используемые и рекомендуемые для учета качества и результативности транспортно-технологических схем и технологий доставки грузов:

- минимальные итоговые издержки;
- минимальные периоды и сроки доставки;
- максимальная эффективность перевозок;
- максимальный совокупный результат грузовладельца.

Для формирования решений по упомянутым выше критериям могут применяться следующие измерители:

- стоимость предоставления транспортной услуги;
- стоимость осуществления терминально-складских операций;
- сроки доставки, регулярность и ритмичность отправок;
- сохранность перевозимого груза;
- потенциальные риски, возникающие в процессе перевозки;
- безопасность технологии доставки;
- величина экологических расходов и ущерба окружающей среде;
- доступность и универсальность транспортных средств;
- этика и культура обслуживания.

В статье [11] рассматриваются ключевые элементы эффективности предоставления транспортных услуг в современных условиях функционирования рыночной экономики. Результативность транспортного процесса является основной задачей совершенствования непосредственно транспортного обслуживания. Эффективность в данной статье рассмотрена с точки зрения разделения деятельности транспорта на подсистемы, требующие четкой и слаженной координации в целом. Современные тенденции работы транспортной отрасли поднимают на поверхность вопросы результативности транспортных

процессов и критериев ее оценки. Обоснование и выбор измерителя – это итог конкретных условий реализации перевозок и метода постановки решаемой задачи, оценить которые возможно с помощью комплексной системы частных и общих критериев эффективности.

5.3 Показатель коэффициента экономической эффективности

Действующие измерители не способны в предельной степени реализовать возможности оперативного управления движением составов грузового сегмента перевозок. В ходе работы разработано предложение, связанное с установлением качественно нового измерителя оценки текущей деятельности специалистов диспетчерского центра управления перевозками (ДЦУП), который наилучшим образом охарактеризует действия (или бездействия), направленные на организацию пропуска грузовых поездов с максимальным результатом экономической эффективности.

В ходе разработки и обоснования показателя экономической эффективности будем считать, что исходным требованием служит пропуск установленного количества составов за определенный период (например, диспетчерскую смену). В качестве измерителя результативности грузовой перевозки предлагается использовать величину падения прибыли при потенциальном нарушении срока доставки той или иной отправки. В основе этого измерителя лежит прогноз траектории следования поезда на оставшейся части маршрута, который учитывает фактическое расписание ее продвижения на период принятия диспетчерского решения.

Формализуем постановку задачи поиска интегрированного экономического результата транспортной услуги с учетом прогнозируемого штрафа за просрочку (пени). Прибыль перевозчика формируется как разность дохода (основанного на тарифе) и суммарных расходов. В предлагаемой модели эта величина принимается неизменной в случае, если временной период доставки груза не превышает предельное значение. Если поезд опаздывает, экономический результат снижается на величину штрафа. В случае линейной зависимости размера штрафа от величины опоздания результат записывается в виде:

$$\Pi = \begin{cases} \Pi_0 & \text{при } T_{\text{пр}} \leq T_0 \\ \Pi_0 - \text{Ш}_1 t_{\text{оп}} & \text{при } T_{\text{пр}} > T_0 \end{cases} \quad (18)$$

где Π_0 – размер прибыли при пунктуальном прибытии поезда, Π_1 – размер пени за каждые сутки опоздания в доставке груза, $t_{оп}$ – количество суток опоздания, $T_0, T_{пр}$ – плановый и фактический моменты прибытия груза на станцию назначения.

Модель формирования экономического результата грузовой перевозки представлена в графическом виде на рисунке 17.

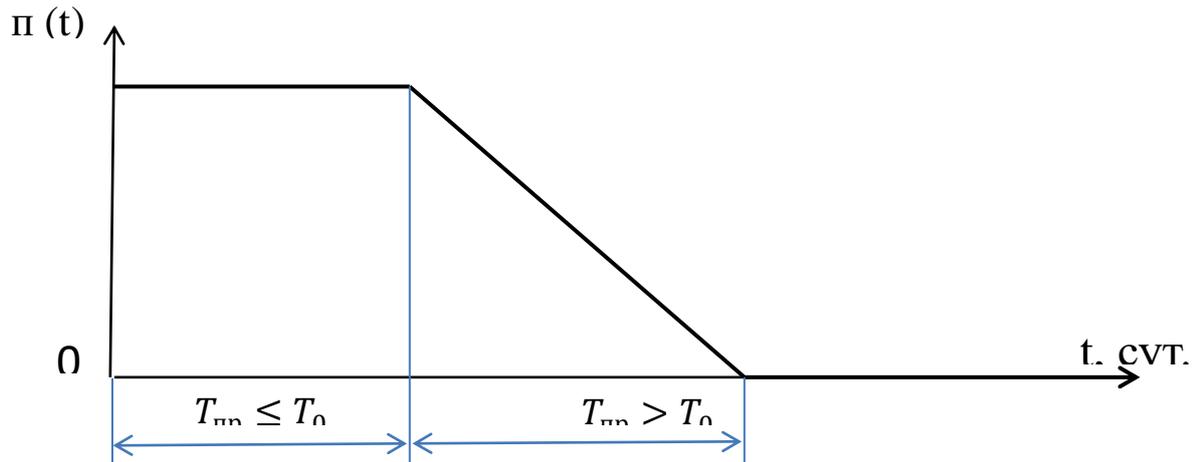


Рисунок 17 – Зависимость экономической эффективности от пунктуальности перевозки (фактически выполненных сроков доставки)

Исходя из правил начисления пени за нарушение планового срока доставки, проведена фрагментация периодов времени в зависимости от характера изменений. Время от принятия груза к перевозке до окончания заданного срока доставки – первый период – характеризуется тем, что перевозчик получает предельно возможную (установленную) прибыль. Второй период характеризуется спадом экономической эффективности вследствие увеличения размера пени, который растёт до максимального значения, соответствующему нижнему ограничению штрафной санкции (согласно требованию Устава [27]). Реализация поездным диспетчером мер по устранению опоздания должно быть направлено на недопущение прибытия поезда в данный временной интервал. Графическая многопоездная модель принятия экономически эффективных диспетчерских регулировок в случае дестабилизации нормативного графика движения поездов представлена на рисунке 18.

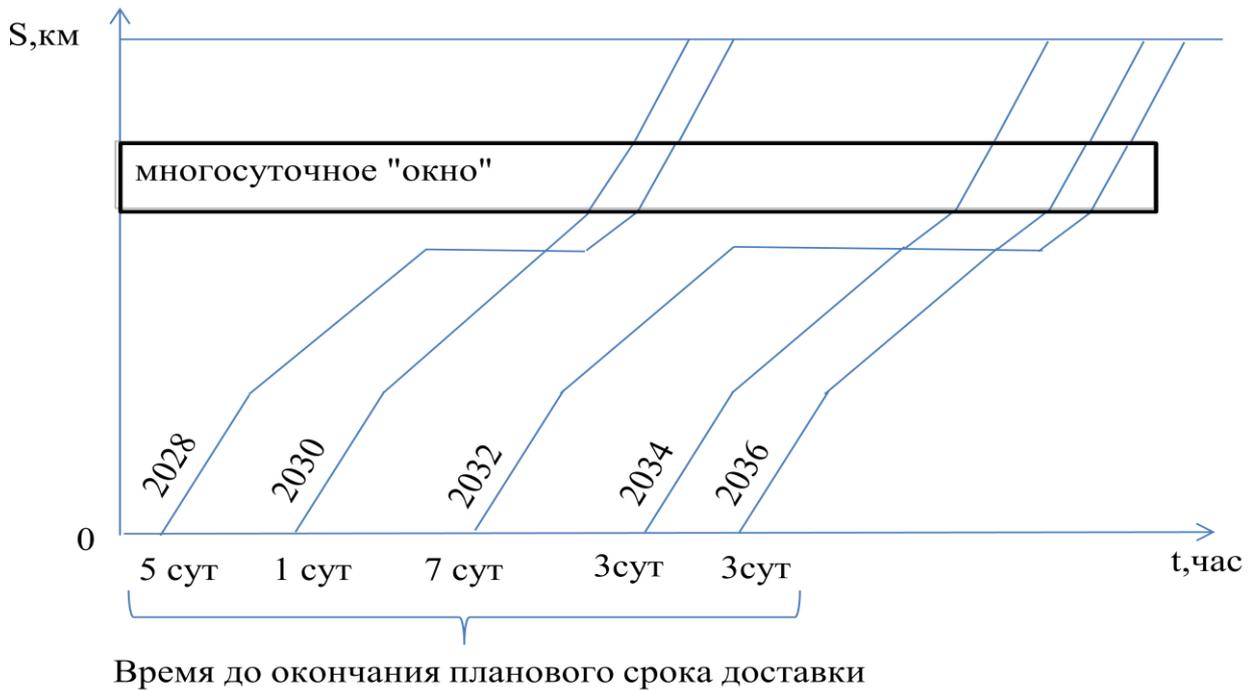


Рисунок 18 – Многопоездная модель принятия диспетчерских решений на основе выполнения нормативных сроков доставки

Рассчитаем протяженность интервала времени от момента окончания заданного срока доставки до момента, когда перевозка реализуется с нулевой прибылью. Для этого воспользуемся зависимостью величины прибыли от сроков доставки:

$$\pi(t) = r * (1 - N_{оп} * \delta) \quad (19)$$

где $\pi(t)$ – экономическая эффективность отдельной отправки, руб., r – размер платы за перевозку отдельной отправки, $N_{оп}$ – нарушение установленных сроков доставки, сут; δ – относительный размер пени за сутки просрочки (0,06); $N_{оп}$ определяется формулой:

$$N = t_{норм} - t_{фактич} \quad (20)$$

где $t_{норм}$ – установленный срок доставки, $t_{фактич}$ – фактический срок осуществления перевозки.

Итоговая экономическая результативность всех принятых к перевозке отправок рассчитывается по формуле:

$$П(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K (п_{ij}) \quad (21)$$

где M – число поездов, K – число отправок в каждом поезде.

Очевидно, диспетчерскому аппарату ДЦУП следует уделять особое внимание, реализовывать регулировочные действия к тем поездам, которые подвержены риску прибытия на станцию назначения во второй зоне – периоде потенциального появления штрафных санкций (пени).

Для определения качества организации движения удобно использовать показатель коэффициента экономической эффективности:

$$K_{\Pi} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K \frac{п_{ij}}{r_j} \rightarrow 1 \quad (22)$$

Коэффициент экономической эффективности находится в интервале от 0 до 1. Таким образом, чем ниже данный измеритель, тем хуже организована перевозка, выше уровень штрафных санкций к компании-перевозчику.

В качестве наглядного примера использования разработанного измерителя, проиллюстрируем ситуацию. Одна из решающих технических станций сети, на которой производится смена средств локомотивной тяги (Карымская, Хабаровск II), претерпевает дефицит локомотивов свойственного направления. В данном случае, в Диспетчерском центре реализуются регулировочные мероприятия по стабилизации работы данной опорной станции. Одним из действенных методов является пропуск поездов через техническую станцию с последующим «отставлением» и возвратом тяги на рассматриваемую узловую станцию. При этом ответственность за потенциальное нарушение заданных сроков доставки полностью лежит на компании-перевозчике. В данной ситуации, предложенный экономический измеритель будет иметь основополагающее значение. С помощью разработанного коэффициента в режиме реального времени можно существует возможность принимать обоснованные решения о выборе конкретных поездов для «отставления», у которых есть резерв соблюдения сроков доставки, указывать на предельно точное время «бросания» данных составов, а также реализовывать решения о приоритетности подъема поездов в рассмотренной ситуации.

5.4 Методика практического использования коэффициента экономической эффективности

Измеритель имеет прикладной характер для оценки качества работы отдельного диспетчерского участка, направления и для сети в целом. Реальное его применение возможно при установлении на отдельно взятую дорогу планового параметра коэффициента экономической эффективности, зависящего от текущего состояния инфраструктуры, технологии работы и технического оснащения. Плановое значение декомпозируется по диспетчерским участкам также в зависимости от состояния объектов инфраструктуры, технологии работы и технического оснащения данного поездного участка. На «скоростных» направлениях данный элемент может быть задан больше единицы, на участках с наличием барьеров (инфраструктурных, технологических), а также на участках, где производится плановое «отставление» поездов от движения (например, по причине неритмичной работы портов), измеритель занижается.

Разработанный коэффициент позволит существенно изменить систему приоритетов при принятии организационных решений, а именно, принимать во внимание в первую очередь сроки доставки, а не на участковую скорость. При данном подходе обоснованным послужит принятие решения по временной остановке транзитных поездов для прицепки вагонов с истекающими сроками доставки, что отражает важность скорости продвижения грузов для экономической результативности работы дороги. При этом, в ряде случаев эффективным оказывается формирование неполносоставных поездов при прогнозируемом завышении параметра накопления. Использование показателя экономической эффективности дает возможность принимать взвешенные, обоснованные регулировочные решения в условиях нарушения надежности состояния инфраструктуры, тем самым, в полной мере осуществляя оперативный управленческий потенциал. Соответственно, использование измерителя позволяет мотивировать специалистов отрасли на экономическую результативность и повышение надежности соблюдения сроков доставки, формировать

ответственность за итоговый результат эксплуатационной перевозочной деятельности.

Придавая особое внимание уровню прибыльности от фактически произведенной эксплуатационной деятельности, диспетчерский аппарат будет нацелен на то, чтобы не допускать «отставления» составов грузовых поездов на промежуточных станциях, на приоритетный подъем и отправление поездов с истекающими сроками доставки. Усовершенствуется система сменно-суточного планирования, установлению планов оперативным работникам на смену. Будет реализовываться наглядный результат по достижению потенциально возможного уровня экономической эффективности от эксплуатационной деятельности, минимизации штрафов за нарушение сроков доставки.

Разработанное в рамках исследования предложение о приоритетности отправления и пропуска поездов с рисками нарушения сроков доставки привело к улучшению показателя надежности: надежность доставки груженых отправок, следующих по инфраструктуре Дальневосточной железной дороги, в 2021 г. осталась на уровне 2020 г. и составила 91 проц., при этом в 2020 г. надежность доставки увеличена на 5,1 проц. по отношению к уровню 2019 г. (85,9 проц.)

Результаты по пятой главе

1. Изменения и инновации в сфере информационного пространства, а также в сферах экономики и современного социума требуют изменения подходов к анализу качества оперативного диспетчерского управления. В последнее время существенно возросла интенсивность грузового движения на магистральных линиях, увеличились размеры и загрузка диспетчерских участков. Усилились требования к необходимому уровню обслуживания пользователей транспортными услугами. Повышение загрузки диспетчерского аппарата потребовало внедрение интеллектуальных систем, способных решать задачи определения обоснованных регулировочных действий.

2. В настоящей главе предложен измеритель, служащий для поиска регулировочных мероприятий, который учитывает текущее изменение экономических приоритетов в тактике организации процесса движения грузовых поездов. В основу показателя вложено требование обеспечения точности прибытия грузов получателям. Предлагается оценка итоговой результативности его использования при работе в действующих условиях работы железнодорожного направления. Экономический эффект от внедрения данного критерия в системе диспетчерского управления позволит сократить сумму штрафов за нарушение нормативных сроков доставки. К дополнительным преимуществам показателя следует отнести: интегральность, простоту расчета и универсальность.

3. Экономический критерий имеет прямое практическое применение посредством разработки и реализации системы поддержки принятия оперативных диспетчерских решений. Коэффициент экономической эффективности позволит в оперативном порядке принимать решения о приоритетном продвижении поездов с истекающими сроками доставки в условиях наличия инфраструктурных барьеров и существенных сбоев, влияющих на продвижение грузовых поездов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в следующем:

1. Предложена методика корректировки элементов графика движения в комплексе с организацией движения виртуально-, жестко-сцепленных поездов, а также объединенных контейнерных поездов на грузонапряженном направлении железной дороги, позволяющая повысить устойчивость графика на 20 проц.

2. Проведены базовые эксперименты по исследованию энергопотребления виртуально-сцепленными грузовыми поездами при обеспечении их беспрепятственного пропуска. Определено, что в этом случае можно достичь значительной экономии по сравнению с пропуском жестко-сцепленных поездов, составляющей 17 проц. от полного расхода энергии.

3. Обоснован математический подход к расчету длительности операций, соответствующих элементам графика, с использованием вероятностного моделирования траекторий движения поездов. График, построенный с учетом вероятности неграфиковых задержек, позволил увеличить фактическую точность прибытия грузовых поездов, следующих на договорной основе по Дальневосточной железной дороге на 5,5 проц., а точность прибытия остальных грузовых поездов на 6,1 проц. (в 2021 г. по отношению к 2020 г.)

4. Определено наличие обратной корреляционной связи между межпоездными интервалами при отправлении с узловой станции и элементами соблюдения времени хода поездов по направлению (участку) в условиях интенсивного потока, в том числе, при использовании технологии вождения виртуально-сцепленных поездов.

5. Предложены сферы применения и условия реализации спаренного пропуска грузовых поездов на направлении с высоким заполнением пропускной способности. Рациональное применение методики сдваивания грузовых поездов в зависимости от эксплуатационной обстановки позволило организовать пропуск 90 поездов на междорожный стыковой пункт Архара (на 5 поездов выше

технического плана), а также достичь экономии удельного расхода электроэнергии в октябре 2021 г. более 10 кВт*ч/10 тыс. ткмбр при организации движения виртуально-сцепленных поездов.

6. Исследована эффективность объединения контейнерных поездов при организации движения на Дальневосточной железной дороге. Применение технологии позволило за два месяца 2022 г. сэкономить 235 ниток графика, 487 рабочих смен локомотивных бригад по четырем депо дороги, 4,04 млн. руб. фонда оплаты труда локомотивных бригад, 1500,1 тыс. кВт*ч электроэнергии, а также увеличить показатель среднего веса поезда на 15,2 тонны и производительность локомотива на 5,5 тыс. т*км брутто среднесуточно.

7. Предложен показатель экономической эффективности при организации диспетчерских регулировочных действий для оценки графика исполненного движения. Разработанное в рамках исследования предложение привело к улучшению показателя надежности соблюдения сроков доставки. В 2020 г. надежность доставки увеличена на 5,1 проц. по отношению к уровню 2019 г.

8. На грузонапряженном направлении железной дороги рекомендуется применение математического подхода к расчету длительности операций, соответствующих элементам графика движения грузовых поездов, в комплексе с организацией движения спаренных поездов.

9. Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является выявление новых закономерностей, характеризующих динамику потока поездов, посредством введения новых возможных сценариев, варьирования факторов и отбора соответствующей статистики. Это позволит перейти к автоматизации адаптивной подстройки графика движения поездов в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветикян, М. А. Система управления движением поездов в условиях структурных преобразований / М. А. Аветикян // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 9. – С. 8-16.
2. Автоматизированное построение оперативных графиков движения поездов с учетом данных спутникового позиционирования / И. Н. Розенберг, В. И. Уманский, С. К. Дулин, С. В. Калинин // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 11. – С. 68-70.
3. Александров, А. А. Применение технологий Big data в сфере транспорта / А. А. Александров, И. И. Пилецкий // Big Data and Advanced Analytics. – 2017. – № 3. – С. 177-180.
4. Апатцев, В. И. К реализации комплексной программы поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию на российских железных дорогах / В. И. Апатцев, В. А. Шаров // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 3. – С. 69-72.
5. Апатцев, В. И. Совершенствование системы организации грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / В. И. Апатцев, В. С. Волков // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 1. – С. 13-16.
6. Апатцев, В. И. Устойчивое управление движением поездов / В. И. Апатцев, В. Ю. Горелик, И. А. Журавлев // Наука и техника транспорта. – 2018. – № 3. – С. 20-23.
7. Бадажков, М. А. Энергоэффективная технология отправления поездов / М. А. Бадажков // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : Материалы XLI Международной научно-практической конференции, Алматы, Казахстан, 03–04 апреля 2017 года / Под редакцией Б.М. Ибраева. – Алматы, Казахстан: Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. – С. 160-164.

8. Батурич, А. П. Организация вагонопотоков в одиогруппные поезда / А. П. Батурич, А. Ф. Бородин, В. В. Панич // Мир транспорта. – 2010. – Т. 8. – № 5(33). – С. 72-77.
9. Башина, О. Э. Возможности применения глобальных технологий Big Data для повышения эффективности логистических процессов / О. Э. Башина, Л. В. Матраева // Знание. Понимание. Умение. – 2017. – № 3. – С. 186-193.
10. Бестемьянов, П. Ф. Контроль движения при координатном регулировании / П. Ф. Бестемьянов, А. М. Романчиков // Мир транспорта. – 2008. – Т. 6. – № 1(21). – С. 104-109.
11. Болгов, С. А. Эффективность транспортного процесса: критерии оценки и пути повышения / С. А. Болгов, Е. В. Болгова // Наука и образование транспорту. – 2017. – № 1. – С. 129-132.
12. Бородин, А. Ф. Научная оценка перспектив модернизации Восточного полигона сети Российских железных дорог / А. Ф. Бородин, М. В. Сторчак // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2017. – № 2. – С. 65-73.
13. Бушуев, С. В. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 1-20.
14. Бушуев, С. В. Расстояние сближения поездов при организации движения по технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, А. Н. Попов // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 1. – С. 273-275.
15. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учебное пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Издание 2-е, стереотипное. – Москва : Издательство "Высшая Школа", 2000. – 480 с.
16. Вопросы повышения стабильности выполнения графика движения поездов / А. Г. Котенко, А. А. Грачев, А. В. Гоголева, Т. М. Шманев // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – № 1. – С. 59-70.
17. Гершвальд, А. С. Оперативное управление процессом грузовых перевозок на железнодорожном транспорте в условиях рыночной экономики :

специальность 05.02.22 "Организация производства (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гершвальд Андрей Самуилович. – Москва, 2004. – 376 с.

18. Горелик, В. Ю. Моделирование системы управления движением поездов на участке / В. Ю. Горелик, В. А. Неплюев // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 3. – С. 44-48.

19. Горелик, В. Ю. Модель диспетчерского управления для анализа устойчивости графика движения поездов / В. Ю. Горелик // Наука и техника транспорта. – 2003. – № 1. – С. 35-37.

20. Давыдов, Б. И. Методологические принципы текущего управления движением потока грузовых поездов / Б. И. Давыдов, В. И. Чеботарев, В. А. Эсаулов // Открытые эволюционирующие системы: цифровая трансформация : тезисы международной научной конференции : посвящается 85-летию образования ДВГУПС, 20-летию Международной научной конференции «Открытые эволюционирующие системы», Хабаровск, 08–09 июля 2022 года / Министерство транспорта Российской Федерации Федеральное агентство железнодорожного транспорта Дальневосточная железная дорога - филиал ОАО «РЖД»; Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 8-9.

21. Давыдов, Б. И. Потери в тяговой сети переменного тока при пакетном пропуске поездов / Б. И. Давыдов, О. Г. Заволока // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – №3. – С. 39-40.

22. Давыдов, Б. И. Экономически эффективное управление движением поездов / Б. И. Давыдов // Экономика железных дорог. – 2012. – № 3. – С. 28.

23. Давыдов, Б. И. Экономическое обоснование рациональной скорости движения грузовых поездов / Б. И. Давыдов, Е. В. Котлярова // Экономика железных дорог. – 2008. – № 4. – С. 17-23.

24. Данилов, К. В. Технологии Big data в железнодорожной отрасли / К. В. Данилов, Н. И. Капустин // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – Т. 1. – № 4(4). – С. 25-33.
25. Дубровин, И. Н. Электроэнергетика и энергосбережение, ресурсосберегающие технологии / И. Н. Дубровин // Новое слово в науке: перспективы развития. – 2016. – № 2(8). – С. 143-145.
26. Елисеев, С. Ю. Комплексная автоматизированная система разработки графика / С. Ю. Елисеев, С. С. Жабров, Ю. В. Попов // Железнодорожный транспорт. – 2005. – №8. – С. 16-21.
27. Закон Российской Федерации «Устав железнодорожного транспорта» от 10.01.2003 № 18-ФЗ // Российская газета. 2003 г. 0 (3122). с изм. и допол. в ред. от 02.08.2019 № 266-ФЗ.
28. Ивницкий, В. А. Проблема перехода к информационно-управляющему режиму в системе оперативной организации перевозочного процесса (ВНИИАС, г. Москва) / В. А. Ивницкий, А. А. Поплавский // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2007. – № 1. – С. 15-21.
29. Инструкция по составлению месячных технических норм эксплуатационной работы: утв. первым министром путей сообщения Н. С. Конаревым 11 августа 1978 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.docs.cntd.ru>. (дата обращения 25.04.2020)
30. Каретников, А. Д. График движения поездов / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1979. – 301 с.
31. Климанов, В. С. Вопросы оперативного регулирования поездопотоков на направлении: диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук: 05.12.08 / Климанов Владимир Сергеевич. – Москва, 1982. – 213 с.
32. Климова, Е. В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединенных грузовых поездов на участках и полигонах железных дорог / Е. В. Климова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 4. – С. 19-23.

33. Климова, Е. В. Методика оценки эффективности формирования и пропуска соединенных грузовых поездов на участках и полигонах железных дорог / Е. В. Климова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 4(35). – С. 19-23.

34. Козырев, С. В. График движения и план формирования поездов – важнейшие составляющие повышения эффективности эксплуатационной работы / С. В. Козырев // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 7. – С. 2-11.

35. Корьев, В. Ю. О едином критерии оценки эффективности использования судов при оперативном планировании и регулировании / В. Ю. Корьев, Д. А. Корьева, Р. И. Самсонов // XII Прохоровские чтения. Водный транспорт: проблемы настоящего, перспективы будущего : по материалам заседания президиума Госсовета по вопросам развития водных путей и транспортной инфраструктуры : сборник статей участников Двенадцатых Прохоровских чтений, Нижний Новгород, 01 декабря 2016 года / Волжский государственный университет водного транспорта. – Нижний Новгород: Типография «Автор», 2017. – С. 45-48.

36. Кочнев, Ф. П. Управление эксплуатационной работой железных дорог. Учебное пособие для ВУЗов / Ф. П. Кочнев, Е. А. Сотников. – М.: Транспорт, 1990. – 424 с.

37. Кузнецов, В. Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2012. – № 33. – С. 18-21.

38. Левин, Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом : монография / Д. Ю. Левин ; Д. Ю. Левин. – Москва : Учеб.-методический центр по образованию на ж.д. трансп., 2008. – 624 с.

39. Математическая модель действий поездного диспетчера при регулировании движения поездов / А. Б. Васильев, А. П. Бадецкий, А. В. Решина, Д. С. Румянцев // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 4(46). – С. 81-86.

40. Мохонько, В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление. – 2004. – №11. – С. 14-16.

41. Мультиагентные технологии адаптивного построения графика движения поездов / А. А. Абрамов, П. О. Скобелев, А. А. Белоусов [и др.] // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2013) : Труды второй научно-технической конференции, Москва, 22 октября 2013 года. – Москва: Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте", 2013. – С. 27-29.

42. Оленцевич, В. А. Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе "виртуальная сцепка" на участке / В. А. Оленцевич, Р. Ю. Упырь, А. А. Антипина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 2(66). – С. 182-189.

43. Оптимальное распределение средств локомотивной тяги на полигоне со сложным рельефом / Е. В. Мединцев, В. А. Эсаулов, Т. Н. Каликина [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2022. – №10. – С. 10-14.

44. Оптимизация управления движением поездов : учебное пособие для студентов специальностей "Управление и информатика в технических системах" и "Электрическая тяга" / [Баранов Л. А. и др.] ; под ред. Л. А. Баранова ; ФГБ ОУ ВПО "Московский гос. ун-т путей сообщ.", Каф. "Упр. и информатика в технических системах". – Москва : ФГБ ОУ ВПО "Московский гос. ун-т путей сообщ.", 2011. – 163 с.

45. Основные критерии и показатели оценки качества и эффективности транспортно-технологических схем и способов доставки грузов / А. С. Пластиков, П. А. Овсянников, О. С. Киргизова, Ю. А. Ракова // XII Прохоровские чтения. Водный транспорт: проблемы настоящего, перспективы будущего : по материалам заседания президиума Госсовета по вопросам развития водных путей и транспортной инфраструктуры : сборник статей участников Двенадцатых

Прохоровских чтений, Нижний Новгород, 01 декабря 2016 года / Волжский государственный университет водного транспорта. – Нижний Новгород: Типография «Автор», 2017. – С. 31-34.

46. Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии "виртуальная сцепка" / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич, Ю. И. Белоголов, В. В. Кашковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 173-180.

47. Оценка энергетической эффективности электровозов 3ЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу "виртуальная сцепка" / С. В. Власьевский, О. А. Малышева, Н. Г. Шабалин, В. В. Семченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 17-25.

48. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 г. №867.

49. Приказ Минтранса России «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» от 21.12.2010 № 286 // Российская газета. 2010 г. с изм. и допол. в ред. от 25.12.2018 г.

50. Распоряжение ОАО «РЖД» №859 «О нумерации поездов для графика движения»: утв. первым вице-президентом ОАО «РЖД» В. Н. Морозовым 5 апреля 2014 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jd-doc.ru>. (дата обращения 25.04.2019)

51. Савоськин, А. Н. Моделирование параметров неоднородного грузового поезда / А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков // Мир транспорта. – 2010. – Т. 8. – № 1(29). – С. 40-45.

52. Сайбаталов, Р. Ф. О предотвращении затруднений в эксплуатационной работе полигонов сети железных дорог / Р. Ф. Сайбаталов, А. Ф. Бородин, Е. В. Бородина // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2015. – № 2(31). – С. 50-52.

53. Сидоренко, В. Г. Методика выравнивания интервалов движения пассажирских поездов метрополитена в условиях ограниченных ресурсов / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2(54). – С. 69-76.

54. Сидоренко, В. Г. Построение планового графика движения для метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Мир транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 3(36). – С. 98-105.

55. Сидоренко, В. Г. Сценарное пространство построения планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 1. – С. 51-56.

56. Симак, Р. С. Оптимизация эксплуатационных расходов железнодорожного транспорта на основе применения информационных систем мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / Р. С. Симак // Перспективы науки. – 2016. – № 3(78). – С. 70-74.

57. Сокращение срока доставки грузов за счет организации движения соединенных грузовых поездов в период предоставления "окон" / О. В. Москвичев, В. И. Александров, Е. В. Александров, Е. А. Мищенко // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 95-97.

58. Сотников, Е. А. Изменения пропускной и провозной способностей высокозагруженных направлений при организации движения соединенных поездов на постоянной основе / Е. А. Сотников, П. С. Холодняк // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78. – № 5. – С. 259-265.

59. Сотников, Е. А. Эксплуатационная работа на железных дорогах мира / Е. А. Сотников, И. Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 1. – С. 72-77.

60. Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования / А. А. Лазарев, Е. Г. Мусатова, Е. Р. Гафаров, А. Г. Кварацхелия. – Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. – 91 с.

61. Тулупов, Л. П. Многофакторное оперативное нормирование времени выполнения технологических процессов / Л. П. Тулупов, Ян Юйлиан // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – №5. – С. 20-24.
62. Уманский, В. И. Об организации пропуска поездов в период технологических "окон" / В. И. Уманский // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 9. – С. 21-24.
63. Управление поездной работой на направлении / Б. Д. Никифоров, Е. М. Тишкин, В. М. Макаров, В. С. Климанов // Железнодорожный транспорт. – 1982. – №2. – С. 17-24.
64. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте : Т. 2 / В. И. Ковалев, А. Т. Осьминин, В. А. Кудрявцев [и др.]. – Москва : УМЦЖДТ, 2011. – 440 с.
65. Шапкин, И. Н. Моделирование поездной работы на основе многофакторного нормирования технологических операций / И. Н. Шапкин, Р. А. Юсипов, Е. М. Кожанов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2006. – № 4. – С. 30-36.
66. Шаров, В. А. Интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию / В. А. Шаров, А. Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 8. – С. 11-21.
67. Шмулевич, М. И. О простое автомобилей в "пробках" / М. И. Шмулевич // Мир транспорта. – 2010. – Т. 8. – № 2(30). – С. 26-32.
68. Экономика железнодорожного транспорта: учебник / под ред.: Н. П. Терешинной, Л. П. Левицкой, Л. В. Шкуриной. – М.: Транспорт, 2012. – 536 с.
69. Экономика железнодорожного транспорта: учебник для вузов / под ред. И. В. Белова. – М.: Транспорт, 1989. – 351 с.
70. Эсаулов, В. А. Использование показателя доходности при оптимизации процесса пропуска грузовых поездов / В. А. Эсаулов, Б. И. Давыдов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018) : Труды седьмой научно-технической конференции, Москва, 14 ноября 2018 года. – Москва:

Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте", 2018. – С. 92-95.

71. Эсаулов, В. А. Методика повышения пунктуальности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / В. А. Эсаулов // Молодые ученые - Хабаровскому краю : Материалы XXIII краевого конкурса молодых ученых, Хабаровск, 12–19 января 2021 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2021. – С. 197-202.

72. Эсаулов, В. А. Обоснование параметров графика движения грузовых поездов / В. А. Эсаулов, Б. И. Давыдов, В. Н. Гопкало // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) : труды Восьмой научно-технической конференции, Москва, 21 ноября 2019 года. – Москва: Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте", 2019. – С. 127-131.

73. Эффективность пропуска спаренных грузовых поездов / В. А. Эсаулов, Б. И. Давыдов, К. Н. Никитенко, А. Г. Лазарев // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 2. – С. 69-78.

74. Юренко, К. И. Исследование энергоэффективных режимов ведения поезда с помощью имитационно-оптимизационной модели / К. И. Юренко, П. А. Харченко, Е. И. Фандеев // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4(51). – С. 68.

75. Al-Ibrahim, A. Dynamic Delay Management at Railways. A Semi-Markovian Decision Approach / A. Al-Ibrahim, 2010. – 335 p.

76. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V. Cacchiani, M. Kidd, P. Toth [et al.] // Transportation Research Part B: Methodological. – 2014. – Vol. 63. – P. 15-37.

77. Badhrudeen, M. Headway analysis using automated sensor data under indian traffic conditions / M. Badhrudeen, V. Ramesh, L. Vanajakshi // Transportation Research Procedia. – 2016. – Vol. 17. – P. 331-339.

78. Basic Framework for Adjusting the Freight Train Schedule / B. Davydov, V. Gopkalo, V. Esaulov, K. Kablukova // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2019. – Vol. 11620 LNCS. – P. 162-176.
79. Carey, M. Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains / M. Carey, A. Kwiecinski // *Transportation Research Part B*. – 1994. – Vol. 28 (4). – P. 251-267.
80. Cordeau, J.-F. A survey of optimization models for train routing and scheduling / J.-F. Cordeau, P. Toth, D. Vigo // *Transportation Science*. – 1998. – Vol. 32(4). – P. 380-404.
81. D’Acierno, L. Optimising frequency-based railway services with a limited fleet endowment: an energy-efficient perspective / L. D’Acierno, M. Botte // *Energies*. – 2020. – Vol. 13(10). – 26 p.
82. D’Ariano, A. Conflict resolution and train speed coordination for solving real-time timetable perturbations / A. D’Ariano, M. Pranzo, I. Hansen // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2007. – Vol. 8(2). – P. 208-222.
83. D’Ariano, A. Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications / A. D’Ariano, 2008. – 230 p.
84. Davydov, B. Methodology for Optimal Solution Search during the Freight Train Schedule Creation / B. Davydov, V. Esaulov, V. Gopkalo // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Science and Technology Conference "EarthScience", Russky Island, 10–12 декабря 2019 года*. – Russky Island: IOP Publishing, 2020. – P. 22-36.
85. Davydov, B. Online train traffic adjustments: Probabilistic modeling and estimating / B. Davydov, V. Chebotarev, K. Kablukova // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2018. – Vol. 631. – P. 50-60.
86. Dong, J. Stochastic modeling of traffic flow breakdown phenomenon: application to predicting travel time reliability / J. Dong, H. Mahmassani // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2012. – Vol. 13(4). – P. 1803-1809.

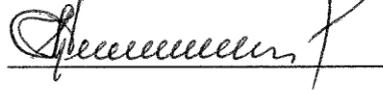
87. Goerigk, M. Recoverable Robust Timetable Information / M. Goerigk, S. Heße, M. Müller-Hannemann [et al.] // *ATMOS 2013: 13th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, Sophia Antipolis, France, September, 2013. – P. 1-14.
88. Goverde, R. Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis / R. Goverde, 2005. – 165 p.
89. Huisman, T. Running times on railway sections with heterogeneous traffic / T. Huisman, R. J. Boucherie // *Transportation Research Part B*. – 2001. – P. 271-292.
90. Jamili, A. Solving a periodic single-track train timetabling problem by an efficient hybrid algorithm / A. Jamili // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2012. – № 25. – P. 793-800.
91. Jovanovic, D. N. Improving railroad on-time performance: Models, algorithms and applications / D. N. Jovanovic, 1991. – 162 p.
92. Kecman, P. A Model-Predictive Control Framework for Railway Traffic Management / P. Kecman, M. Goverde, V. Boom // *3th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Zurich, Switzerland, February 11–13, 2009. – P. 57-72.
93. Kraft, E. R. A reservations-based railway network operations management system / E. R. Kraft, 1999. – 164 p.
94. Mazzarello, M. A traffic management system for real-time traffic optimization in railways / M. Mazzarello, E. Ottaviani // *Transportation Research Part B*. – 2007. – Vol. 41(2). – P. 246-274.
95. Meester, L. E. Stochastic delay propagation in railway networks and phase-type distributions / L. E. Meester, S. Muns // *Transportation Research Part B*. – 2007. – Vol. 41. – P. 218-230.
96. Mes, M. Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems / M. Mes, A. Van der Heijden, N. Van Harten // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – Vol. 181(1). – P. 59-75.

97. Radhakrishnan, S. Discharge headway model for heterogeneous traffic conditions / S. Radhakrishnan // *Transportation Research Procedia*. – 2015. – Vol. 10. – P. 145-154.
98. Reinhard, B. Rules of thumb: practical online-strategies for delay management / B. Reinhard, A. Schöbel // *Public Transp.* – 2014. – Vol. 6. – P. 85-105.
99. Riccardo, R. An empirical analysis of vehicle time headways on rural two-lane two-way roads / R. Riccardo, G. Massimiliano // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. – 2014. – Vol. 54(4). – P. 865-874.
100. Salido, M. A. Robustness in Railway Transportation Scheduling / M. A. Salido, F. Barber, L. Ingolotti // *7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, June 25–27, 2008*. – P. 2880-2885.
101. Scenario-based approach to analysis of travel time reliability with traffic simulation models / J. Kim, H. Mahmassani, P. Vovsha [et al.] // *Transportation research record: journal of the transportation research board*. – 2013. – P. 56-58.
102. Stochastic delay prediction in large train networks / A. Berger, A. Gebhardt, M. Müller-Hannemann [et al.] // *ATMOS 2011: 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems, Saarbrücken, Germany, September 8, 2011*. – P. 100-111.
103. Thompson, L. A vision for railways in 2050 / L. Thompson // *International Transport Forum, Leipzig, Germany, April 30, 2010*. – 33 p.
104. Törnquist, J. Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: a review of models and algorithms / J. Törnquist // *ATMOS 2005: 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways, Ronneby, Sweden, August 9, 2006*. – 23 p.
105. Valeev, S. S. Reference model for large scale industry management based on big data concept / S. S. Valeev, N. V. Kondratyeva // *Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016) : Proceedings of the 4th International Conference, Ufa, 17–19 мая 2016 года*. – Ufa: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2016. – P. 15-18.

106. Yanfeng, L. I. Multi-class dynamic network traffic flow propagation model with physical queues / L. I. Yanfeng, L. I. Jun // *Frontiers of engineering management*. – 2017. – Vol. 4. – P. 399-407.

107. Zhang, W.-B. Data Collection for Measuring Performance of Integrated Transportation Systems / W.-B. Zhang, A. Skabardonis, M. Li [et al.] // *Traffic Data Collection and its Standardization. International Series in Operations Research & Management Science*. – 2010. – Vol. 144. – P. 25-45.

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер Дальневосточной
дирекции управления движением Рыжов Р.В.

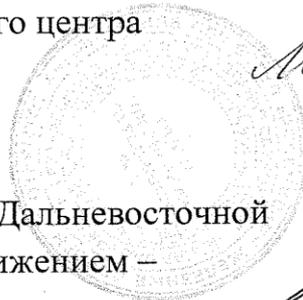
«28» декабря 2021 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Эсаулова Вячеслава Александровича на тему
«Методы совершенствования технологии пропуска грузовых поездов на
грузонапряженном направлении железной дороги»**

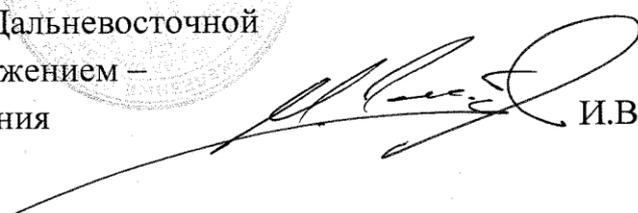
Комиссия Дальневосточной дирекции управления движением в составе заместителя начальника дирекции – начальника Диспетчерского центра управления перевозками Мединцева Е.В., заместителя начальника дирекции – начальника службы движения Гайдамаки И.В. рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Эсаулова Вячеслава Александровича и установила следующее: разработанное в рамках диссертационного исследования предложение о корректировке элементов графика движения в зависимости от текущей поездной обстановки в настоящее время используется диспетчерами поездными в повседневной работе при планировании отправления грузовых поездов с технических станции, находящихся на вверенных поездных участках.

Заместитель начальника Дальневосточной
дирекции управления движением –
начальник Диспетчерского центра
управления перевозками




Е.В.Мединцев

Заместитель начальника Дальневосточной
дирекции управления движением –
начальник службы движения



И.В.Гайдамака

График движения поездов на участке Облучье - Хабаровск_II 24.03.2022 - 25.03.2022

НАИМЕНОВАНИЕ РАЙОННОЙ ПУНКТОВ	РАССТОЯНИЕ ОТ СТАЦИИ (км)	ПРЕД. ПУНКТ	ПОСЛЕД. ПУНКТ
-------------------------------	---------------------------	-------------	---------------

НАИМЕНОВАНИЕ РАЙОННОЙ ПУНКТОВ	РАССТОЯНИЕ ОТ СТАЦИИ (км)	ПРЕД. ПУНКТ	ПОСЛЕД. ПУНКТ
-------------------------------	---------------------------	-------------	---------------

