

На правах рукописи



Гунбин Антон Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ
СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК С МНОГОВАГОННЫМИ ОТЦЕПАМИ**

05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Климов Александр Александрович

Официальные оппоненты:

Рахмангулов Александр Нельевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра «Логистики и управления транспортными системами», профессор.

Кашеева Наталья Вячеславовна, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Управление эксплуатационной работой», доцент.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Защита состоится «27» сентября в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационного совета.

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

Автореферат разослан «25» августа 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На железных дорогах общего пользования в настоящее время имеются участки с ограничениями по пропускной способности. Согласно Стратегии развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года планируется дальнейший рост размеров грузовых перевозок и реализация ряда инвестиционных проектов по развитию сети железных дорог общего пользования. Одной из стратегических задач развития отрасли является увеличение пропускной способности перегонов и станций, а также перерабатывающей способности станций, в первую очередь, технических.

В ОАО «РЖД» реализуется Программа развития и размещения сортировочных станций, в которой определены мероприятия по развитию эксплуатируемых станций. Перерабатывающая способность сортировочных станций зависит от их технического оснащения и технологии работы, в том числе от применяемой технологии расформирования составов на сортировочной горке. В частности, на перерабатывающую способность горки влияют следующие факторы: режимы роспуска, скорости надвига и роспуска составов, количество вынужденных остановок роспуска, структура отцепопотока, особенности выполнения маневровой работы в сортировочном парке и др.

Определение технических характеристик и технологических параметров работы горки производится по нормам проектирования сортировочных устройств. Конкретные особенности технологии расформирования составов для каждой станции указываются в инструкции по работе сортировочной горки. При этом определение ограничений по конструктивным и технологическим параметрам горки производится по результатам скатывания одиночных вагонов.

В 2013 г. на сети железных дорог общего пользования введена в действие Инструкция № ЦД49-р, в которой определен порядок расчета максимально допустимой длины отцепа при роспуске на сортировочных горках. В данной методике отцеп рассматривается в виде материальной точки, что является принятым допущением и также применяется для расчета основных конструктивных параметров горки, в которых рассматриваются отцепы из одиночных вагонов. Многовагонные отцепы имеют особенности динамики скатывания с сортировочной горки, и рассмотрение таких отцепов в виде материальной точки может приводить к погрешности получаемых результатов. В результате, использование действующей методики на практике может приводить к снижению перерабатывающей способности сортировочных горок и станций в целом. В диссертационной работе многовагонные отцепы рассматриваются в виде системы шарнирно-осевых моделей вагонов с учетом межвагонных связей, что является отличием от существующего представления многовагонного отцепа в методике по расчету максимально допустимого числа вагонов в отцепе. Таким образом, вы-

бранное направление научного исследования в диссертационной работе, посвященное изучению процесса скатывания с сортировочной горки многовагонных отцепов, является актуальным на современном этапе.

Степень разработанности темы исследования. В становление и развитие теории проектирования сортировочных устройств горочного типа, а также совершенствование технологии работы сортировочных горок большой вклад внесли следующие ученые и специалисты: В. Л. Арнольд, С. А. Бессоненко, В. И. Бобровский, С. П. Бузанов, А. В. Быкадоров, Е. А. Гибшман, М. Г. Дашков, Г. Д. Дубелир, В. И. Жуков, С. В. Карасев, С. Д. Карейша, А. М. Карпов, А. А. Климов, В. А. Кобзев, С. С. Мацкель, Ю. А. Муха, В. Д. Никитин, В. Н. Образцов, В. Е. Павлов, А. И. Павловский, Н. В. Правдин, В. М. Рудановский, А. Г. Савицкий, Е. А. Сотников, И. П. Старшов, И. И. Страковский, Л. Б. Тишков, Х. Т. Туранов, Н. И. Федотов, Н. М. Фонарев, А. Н. Фролов, А. Н. Шабельников, Е. М. Шафит, В. П. Шейкин, В. Н. Шелухин и др.

Исследования по совершенствованию методов расчета сортировочных горок в основном выполнялись в области оптимизации параметров плана и профиля горки и обеспечения безопасности сортировочного процесса. В результате была сформулирована действующая методика проектирования сортировочных горок, основанная на выполнении комплексных расчетов высоты и продольного профиля горки, а также технологических расчетов для одновагонных отцепов с различными ходовыми характеристиками (расчетных бегунов). При этом в меньшей степени выполнялись исследования динамики скатывания многовагонных отцепов и оценки ее влияния на конструкцию горки и процесс роспуска.

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии роспуска многовагонных отцепов для повышения перерабатывающей способности и безопасности работы сортировочных горок.

В диссертационной работе для достижения цели решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ текущего состояния теории расчета, практики проектирования и опыта эксплуатации сортировочных горок с учетом роспуска многовагонных отцепов.

2. Разработана имитационная модель скатывания отцепов, в том числе многовагонных, при роспуске с сортировочной горки.

3. Выполнено исследование процесса скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки с использованием имитационной модели для проверки действующих положений методики расчета продольного профиля сортировочных горок и разработки предложений по ее совершенствованию.

4. Разработаны предложения по совершенствованию методики определения

максимально допустимого количества вагонов в отцепе при роспуске с сортировочной горки с использованием имитационного моделирования.

5. Определена эффективность изменения технологии переработки многовагонных отцепов на сортировочной горке.

Объект исследования: Линейные предприятия транспортной сети.

Область исследования: Развитие транспортной сети, ее структур и линейных предприятий.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании использованы методология и теоретические положения трудов в области расчета и эксплуатации сортировочных горок ученых отечественной научной школы, а также зарубежных ученых. Имитационная модель скатывания отцепов с горки разработана с учетом положений действующих нормативных документов по проектированию сортировочных горок, теории вероятностей и математической статистики. Для оценки адекватности имитационной модели использованы методы верификации и валидации. Выполнялась обработка данных о техническом оснащении и технологии работы существующих сортировочных горок, структуре отцепопотока, проводились натурные наблюдения за скатыванием многовагонных отцепов для исследования динамики их скатывания с горки и определения потребной мощности тормозных средств. В работе использовались положения теории планирования экспериментов и методы оценки экономической эффективности на железнодорожном транспорте.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана новая математическая модель для определения точки отрыва многовагонных отцепов от состава при роспуске.

2. Разработана новая имитационная модель скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки с учетом взаимодействия вагонов внутри отцепа.

3. Предложен новый критерий для определения максимально допустимого числа вагонов в отцепе и сформулированы предложения по совершенствованию методики расчета максимальной длины отцепа.

4. Разработан метод определения эффективности изменения максимально допустимого числа вагонов в отцепе.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты выполненных исследований могут использоваться при проектировании и для совершенствования технологии работы сортировочных горок. Разработанные методы и модели рекомендуются для совершенствования технологии роспуска составов, с целью сокращения затрат и увеличения перерабатывающей способности, а также повышения уровня безопасности сортировочного процесса. Итоги исследований могут быть учтены при корректировке действующей Инструкции по расчету максимально допустимой длины

отцеп.

Реализация и внедрение результатов работы. Полученные по результатам работы практические рекомендации по оценке технологии работы сортировочных горок приняты к использованию Западно-Сибирской дирекцией управления движением – структурным подразделением Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД». Выполнена апробация результатов диссертационного исследования для условий работы нечетной сортировочной горки ст. Инская Западно-Сибирской железной дороги. Получены акт внедрения результатов диссертационной работы, а также свидетельства о государственной регистрации разработанных следующих электронных ресурсов:

1. Программа имитационного моделирования скатывания отцепов из нескольких вагонов с сортировочной горки “СКАТ-Отцеп”.

2. Алгоритм “Автоматизированный анализ структуры вагонного парка”.

Разработанные модель скатывания многовагонных отцепов и методы определения максимально допустимой длины отцепа используются в учебном процессе кафедры «Железнодорожные станции и узлы» СГУПС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения точки отрыва многовагонного отцепа от состава с учетом взаимодействия вагонов в отцепе.

2. Имитационная модель скатывания многовагонного отцепа с сортировочной горки для выполнения конструктивных и технологических расчетов.

3. Метод расчета максимально допустимого количества вагонов в отцепе при роспуске с сортировочной горки с использованием имитационного моделирования.

4. Метод определения эффективности изменения максимально допустимого числа вагонов в отцепе.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность выполненных исследований и полученных результатов подтверждается корректным использованием и применением в работе положений фундаментальных и прикладных наук. Адекватность разработанной имитационной модели подтверждена методами верификации и валидации, для этого был произведен расчет U-критерия Манна – Уитни для экспериментальных и эмпирических данных, а также произведено сравнение основных параметров движения отцепа при расчете аналитическим методом и методом имитационного моделирования.

Основные положения диссертационной работы были рассмотрены на международных научно-практических конференциях: «Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе» (СГУПС, Новосибирск, 2012 г.), «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (ИрГУПС, Иркутск, 2016 г.), «Политранспорт-

ные системы» (СГУПС, Новосибирск, 2016 и 2018 гг.). Результаты исследований по диссертационной работе были рассмотрены и получили положительную оценку на заседаниях кафедры «Железнодорожные станции и узлы» (СГУПС, Новосибирск, 2012-2019 гг.).

В целом результаты диссертационного исследования представлены и получили одобрение на расширенном заседании кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» (УрГУПС) 04.04.2019 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в шести научных работах, в том числе три статьи опубликовано в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, одна научная работа опубликована в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus. Получены свидетельства о государственной регистрации электронных ресурсов № 18663 и № 22008 ОФЭРНиО.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 135 наименований, пяти приложений. Содержание работы изложено на 129 страницах основного текста. Диссертационная работа включает 90 таблиц и 41 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи по диссертационной работе, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также представлены данные об апробации результатов работы.

В первой главе выполнен обзор и анализ этапов развития теории расчета и опыта эксплуатации сортировочных горок, а также обзор изменений в нормативной документации, регламентирующей конструкцию и технологию работы сортировочных устройств.

В начале XX в. было сформулировано несколько способов описания процесса скатывания отцепов с горки. Это были аналитические и графические методы расчета динамики скатывания, в которых отцеп представлялся как материальная точка. К середине XX в. широко использовались графоаналитические методы для определения момента отрыва и динамики скатывания как одновагонных, так и многовагонных отцепов. При этом в отдельных работах учитывалось распределение массы внутри отцепа, состоящего из нескольких вагонов. Отцеп представлялся как гибкая нерастяжимая нить и идентифицировался при движении по двум точкам – «голове» и «хвосту» отцепа. Однако использованные в графоаналитических методах допущения позволяли получать весьма приблизительные значения для равномерно загруженных многова-

гонных отцепов. При неоднородном распределении массы внутри отцепа вводились дополнительные точки для описания динамики скатывания такого отцепа, что существенно усложняло расчет.

Впоследствии, для описания динамики скатывания отцепов стали использовать имитационные модели для ЭВМ, в основе которых лежало решение дифференциальных уравнений численными методами. В настоящее время разработано несколько имитационных моделей, в которых используется шарнирно-осевое описание отцепа. В основном моделируется скатывание одиночных вагонов, что соответствует действующим методам горочных расчетов.

Продолжительный период при расчете сортировочных устройств многовагонные отцепы не использовались, а выбор конструктивных и технологических параметров горок производился на основании анализа результатов скатывания одиночных вагонов – расчетных бегунов. С 1992 г. при проверке мощности немеханизированных тормозных позиций рекомендуется дополнительно выполнять проверку остановки отцепа из двух груженных восьмиосных вагонов при полном использовании длины тормозной позиции спускной части. Указанный порядок расчета сохранился и в действующих Правилах и нормах.

На большинстве эксплуатируемых сортировочных горках значительная доля вагонопотока перерабатывается в многовагонных отцепах. Однако до 2013 г. порядок расчета максимально допустимого количества вагонов в отцепе при роспуске с сортировочной горки не регламентировался.

Действующая методика определения максимально допустимого числа вагонов в отцепе, наряду с удобством проведения расчетов, содержит ряд допущений. Так, в расчетах используется величина ускорения свободного падения g . При этом не учитывается инерция вращающихся частей вагонов, которая в классических горочных расчетах заложена в величину g' . Также не учитываются потери энергетической высоты при преодолении отцепом неуправляемых сил сопротивления движению (кроме основного сопротивления) и зависимость максимально допустимого числа вагонов в отцепе от его структуры, что значительно влияет на ходовые свойства. Не сформулированы требования к расчетным параметрам внешней среды и другим необходимым условиям для выполнения расчетов. Скорость роспуска, во многом определяющая динамику скатывания многовагонного отцепа, предлагается принимать по местным инструктивным документам. При этом в Правилах и нормах имеются конкретные указания по определению скорости роспуска в зависимости от мощности сортировочной горки и характера решаемых задач. Суммарный запас энергетической высоты отцепа определяется как максимальная разница высот между вершиной горки и парковой тормозной позиции (ПТП). При проверке достаточности мощности тормозных

средств по действующей методике не учитывается, что для «длинных» многовагонных отцепов запас энергетической высоты будет меньшим, поскольку центр масс в момент отрыва всегда находится ниже вершины горки.

Результаты проведенного анализа показывают, что при проектировании и анализе работы эксплуатируемых сортировочных горок целесообразно дополнительно учитывать особенности скатывания многовагонных отцепов.

Вторая глава посвящена разработке имитационной модели скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки. При моделировании скатывания многовагонных отцепов каждый отцеп рассматривается как система сцепленных между собой вагонов с сосредоточенными массами, распределенными на соответствующую ось каждого вагона. В модели колесные оси соединены однородным стержнем в пределах одного вагона и упругими связями между вагонами внутри отцепа.

Для учета в имитационной модели межвагонных связей выполнен анализ и построена регрессионная модель работы поглощающих аппаратов. Для этого произведен анализ работы поглощающих аппаратов автосцепок и определены силовые характеристики, приведенные на рисунке 1. С помощью полученных уравнений регрессии производится расчет удельных сил сопротивления движению, возникающих в поглощающих аппаратах (r). Удельная профильная сила ($f_{пр}$) и силы сопротивления движению отцепа (основного w_o , от воздушной среды и ветра $w_{св}$, от снега и инея $w_{сн}$, от стрелочных переводов и кривых $w_{ск}$, при торможении $w_{тп}$) при моделировании определяются в соответствии с положениями действующих Правил и норм.

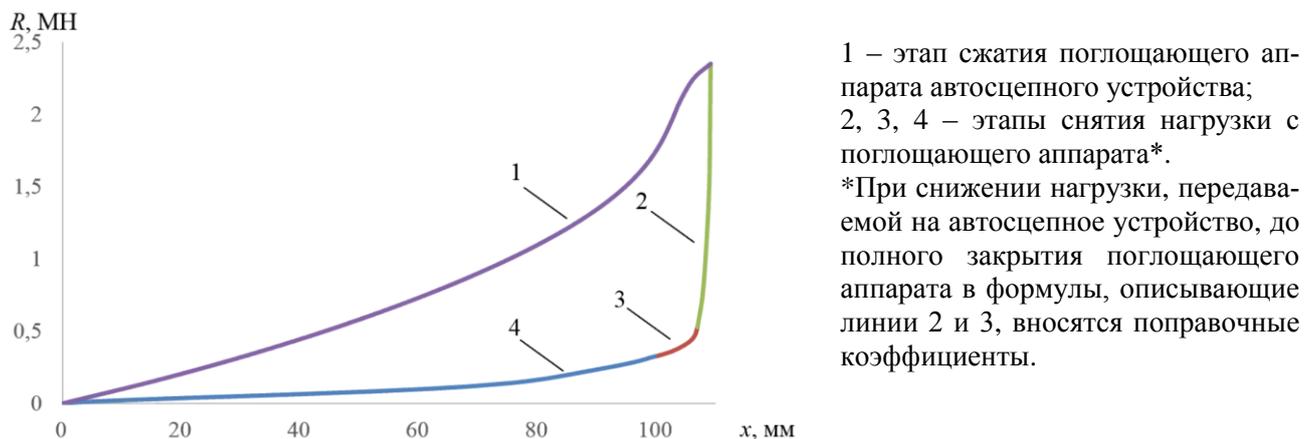
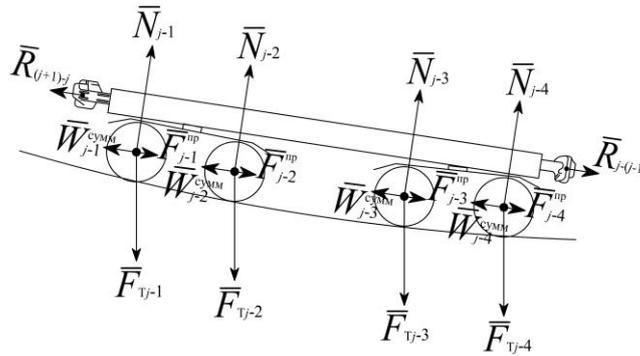


Рисунок 1 – Регрессионная модель силовой характеристики фрикционного поглощающего аппарата автосцепного устройства вагона

При разработке модели были составлены алгоритм определения точки отрыва отцепа от надвигаемого состава с учетом положения зоны расцепки горочного составителя и алгоритм расчета динамики скатывания отцепа при роспуске с сортировочной горки. Моделирование движения отцепа производится по заданному профилю с

учетом перераспределения сил, возникающих внутри многовагонного отцепа при спуске с сортировочной горки (рисунок 2).



$\bar{F}_{j-i}^{пр}$ – профильная ускоряющая сила, отнесенная на i -ю колесную пару j -го вагона в отцепе, Н;
 $\bar{W}_{j-i}^{сумм}$ – суммарная сила сопротивления движению j -го вагона в отцепе, отнесенная на i -ю колесную пару, Н; \bar{N}_{j-i} – реакция опоры, отнесенная на i -ю колесную пару j -го вагона в отцепе, Н; \bar{F}_{Tj-i} – сила тяжести, отнесенная на i -ю колесную пару j -го вагона в отцепе, Н; $\bar{R}_{j-(j-1)}$ – сила реакции связи, возникающая между j -м и $(j-1)$ -м вагонами в отцепе, Н.

Рисунок 2 – Схема разложения сил, действующих на вагон многовагонного отцепа при движении по элементам продольного профиля

Расчет изменения энергетической высоты при скатывании отцепа с горки (Δh) выполняется для каждого элементарного расчетного участка (Δl) по формуле:

$$\Delta h = \Delta l \cdot (f_{пр} - w_0 - w_{св} - w_{ск} - w_{сн} - r - w_{тп}) \cdot 10^{-3}. \quad (1)$$

Для выполнения исследований разработана программа для ЭВМ «СКАТ-Отцеп» имитирующая отрыв и движение отцепа, состоящего из любого количества вагонов, по участку продольного профиля сортировочной горки.

Третья глава посвящена исследованию динамики скатывания многовагонных отцепов с горки на основе имитационного моделирования. Выполнена валидация и верификация разработанной имитационной модели. При верификации установлено, что расхождение данных имитационного моделирования и численного расчета, выполненного методом трассировки, не превышает 5 %. Валидация программы выполнена путем сопоставления результатов имитационного моделирования и натуральных экспериментов. Установлено, что полученные результаты находятся в рамках статистической погрешности для уровня статистической значимости 0,05. Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности разработанной имитационной модели скатывания многовагонных отцепов.

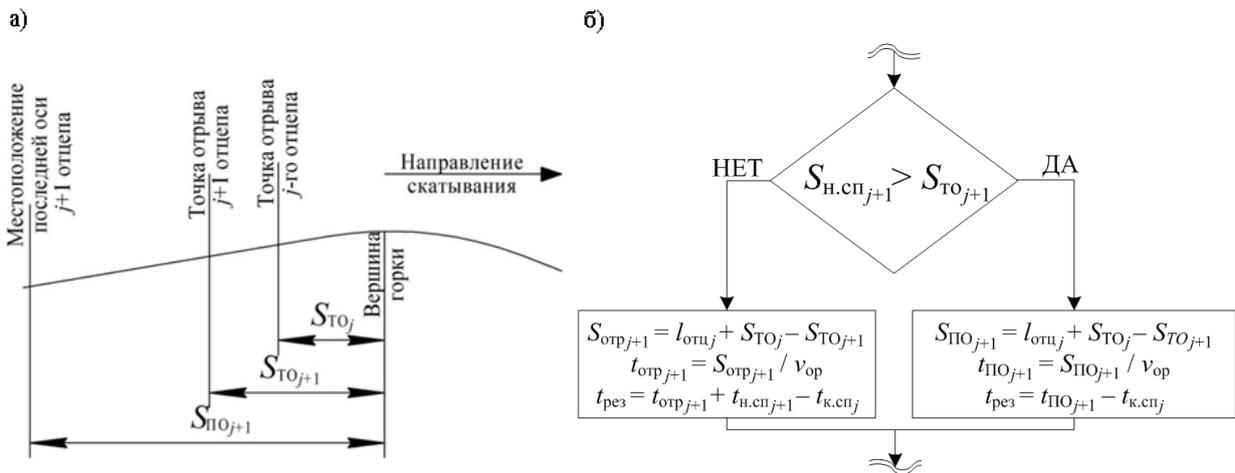
Для исследования динамики скатывания многовагонных отцепов произведен анализ перерабатываемого вагонопотока для эксплуатируемой сортировочной горки «Н». Установлено, что среднее число вагонов в отцепе составляет 3,7. При этом доля вагонов, перерабатываемых в отцепках с числом вагонов более 5, составляет около 60 % от общего перерабатываемого на горке вагонопотока, более 10 вагонов в от-

цепе – 40 %, более 20 – 22 %. Полученные результаты подтверждают необходимость учета динамики скатывания многовагонных отцепов при выполнении технологических и конструктивных расчетов для сортировочных горок, что наиболее точно отражает реальные условия их работы.

С использованием имитационной модели были проведены исследования прохождения многовагонных отцепов через горб сортировочной горки. На примере эксплуатируемой горки «Н» установлено, что необходимость применения тормозных средств во время расцепки отцепов зависит от плана и профиля элементов, на которых расположен отцеп, и структуры многовагонного отцепа.

Выполненная проверка скорости входа отцепов различной длины на разделительные элементы, расположенные на спускной части сортировочной горки, показала, что данную проверку целесообразно производить по результатам скатывания одиночного бегуна ОХ-100, поскольку скатывание многовагонных отцепов происходит с меньшими скоростями.

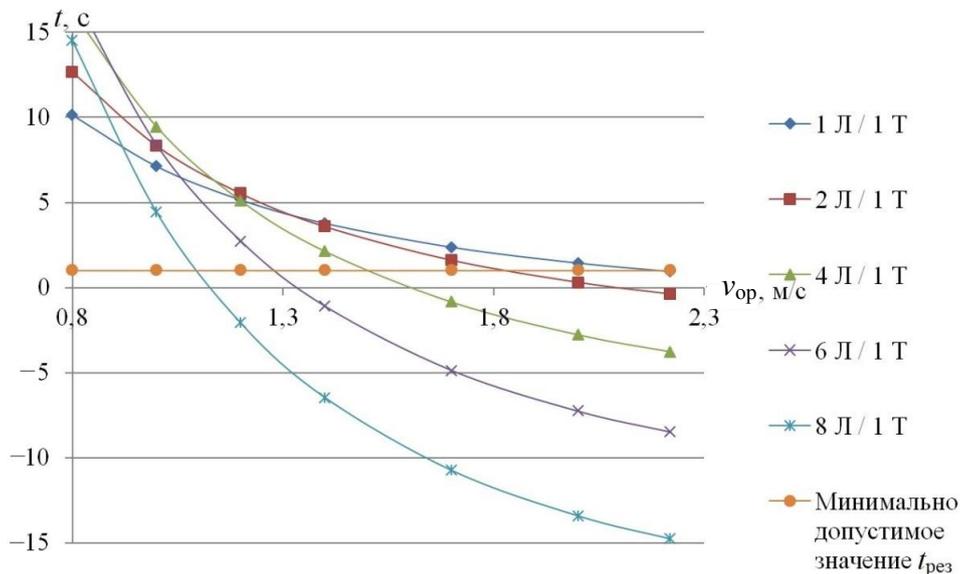
По результатам моделирования также установлено, что проверку временных интервалов рекомендовано производить не только для одиночных вагонов расчетного сочетания, но и для смежных многовагонных и одновагонных отцепов. В таком случае важно правильно определить точки отрыва смежных отцепов от надвигаемого состава (рисунок 3.а). Фрагмент алгоритма расчета временных интервалов между смежными отцепами ($t_{рез}$) приведен на рисунке 3.б. Алгоритм расчета временных интервалов между смежными отцепами реализован в разработанной программе для ЭВМ «СКАТ-Отцеп».



$S_{тоj+1}$ – положение последней оси отцепа в момент отрыва $(j+1)$ -го отцепа, м; $S_{н.спj+1}$ – положение последней оси отцепа в момент пересечения изостыка разделительного элемента на спускной части сортировочной горки $(j+1)$ -м отцепом, м; $S_{поj+1}$ – расстояние от первого изостыка до положения последней оси отцепа $j+1$ в момент отрыва j -го отцепа, м; $t_{поj+1}$ – время скатывания $(j+1)$ -го отцепа от момента отрыва до входа на разделительный элемент, с; $v_{ор}$ – скорость роспуска, м/с; $t_{к.спj}$ – время скатывания, j -го отцепа от момента отрыва до освобождения разделительного элемента, с.

Рисунок 3 – Принципиальная схема положения смежных отцепов на горбе горки и алгоритм определения резерва времени на разделительном элементе спускной части сортировочной горки

Выполнен анализ временных интервалов по первому разделительному элементу по двум вариантам – для стрелочного перевода и тормозной позиции. Установлено, что временные интервалы на первом разделительном элементе зависят от скорости надвига, длины и структуры отцепопотока. При увеличении числа вагонов в отцепе влияние скорости роспуска на временной интервал на первом разделительном элементе уменьшается. Если в смежных отцепках число вагонов увеличивается, то при низких значениях скорости роспуска временной интервал на первом разделительном элементе будет возрастать вне зависимости от структуры многовагонных отцепов, рисунок 4.



Л, Т – «легкая» или «тяжелая» весовая категория вагонов в отцепе;
1, 2, 4, 6 и 8 – число вагонов в отцепе.

Рисунок 4 – График зависимости временных интервалов между смежными отцепками на первом разделительном элементе от скорости надвига

В случае скатывания одиночных отцепов вслед за многовагонными отцепками требуется снижение скорости роспуска для предотвращения нагона впереди идущего отцепа на спускной части горки. Кроме того, скорость роспуска влияет на вероятность появления отцепов-чужаков (попадающих не на свой путь назначения) из-за несоблюдения пространственно-временных интервалов на разделительных элементах.

Решение рассмотренных выше задач целесообразно проводить для условий работы каждой сортировочной горки. Для сочетаний одновагонных и многовагонных отцепов необходимо выполнять проверку пространственно-временных интервалов на разделительных элементах для благоприятных и неблагоприятных условий роспуска.

Четвертая глава посвящена совершенствованию методики определения максимально допустимого числа вагонов в отцепе с использованием разработанной имитационной модели. По результатам проведенного моделирования скатывания с горки

многовагонных отцепов предлагается определять ограничения по максимально допустимому количеству вагонов в отцепе по следующим критериям:

1. K_1 – критерий, характеризующий имеющуюся мощность тормозных средств ($H_{\text{тс}}$) при роспуске многовагонных груженных отцепов (максимально допустимое число вагонов в отцепе N^{K_1} , с хорошими ходовыми характеристиками). Оценка производится по двум параметрам:

– общая энергетическая высота отцепа ($H_{\text{отц}}$) на спускной части горки и в начале подгорочного парка;

– вероятность остановки многовагонного отцепа на тормозной позиции ($P_{\text{торм}}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{\text{отц}}^{N^{K_1+1}} > H_{\text{тс}} \geq H_{\text{отц}}^{N^{K_1}}, \\ N^{K_1} \rightarrow \max, \\ P_{\text{торм}} = \frac{n_{\text{торм}}}{n_{\text{эксп}}} = 1, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $n_{\text{торм}}$ – количество остановленных многовагонных отцепов на парковой тормозной позиции, ед.;

$n_{\text{эксп}}$ – количество экспериментов, ед.

2. K_2 – критерий, характеризующий возможность освобождения при скатывании многовагонными отцепами (максимально допустимое число вагонов в отцепе N^{K_2} , с плохими ходовыми качествами) стрелочной зоны спускной части горки и/или парковой тормозной позиции. Оценка производится по двум параметрам:

– фактическая дальность пробега отцепа ($S^{N^{K_2}}$);

– вероятность докатывания отцепа ($P_{\text{док}}$) до конца расчетного маршрута ($S_{\text{маршр}}$) при количестве экспериментов ($n_{\text{эксп}}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} S^{N^{K_2+1}} < S_{\text{маршр}} \leq S^{N^{K_2}}, \\ N^{K_2} \rightarrow \max, \\ P_{\text{док}} = \frac{n_{\text{док}}}{n_{\text{эксп}}} = 1, \end{array} \right. \quad (3)$$

где $n_{\text{док}}$ – количество докатившихся отцепов до конца расчетного маршрута, ед.

Итоговое ограничение по максимально допустимому числу вагонов в отцепе принимается по следующей формуле:

$$N_{\text{max}} = \min(N^{K_1}, N^{K_2}). \quad (4)$$

При исследовании ограничения длины отцепа по критерию K_1 была выполнена серия экспериментов по определению зависимости потребной мощности тормозных средств сортировочной горки от числа вагонов в отцепе. Результаты моделирования приведены на рисунке 5.

Установлено, что уменьшение потребной мощности тормозных средств, при увеличении числа вагонов в отцепе, связано с понижением уровня условного центра масс в многовагонном отцепе ($h_{\text{ц.м.}}$), по сравнению с одновагонным отцепом. Принци-

пиальная схема определения центра масс при роспуске многовагонного отцепа с сортировочной горки приведена на рисунке 6.

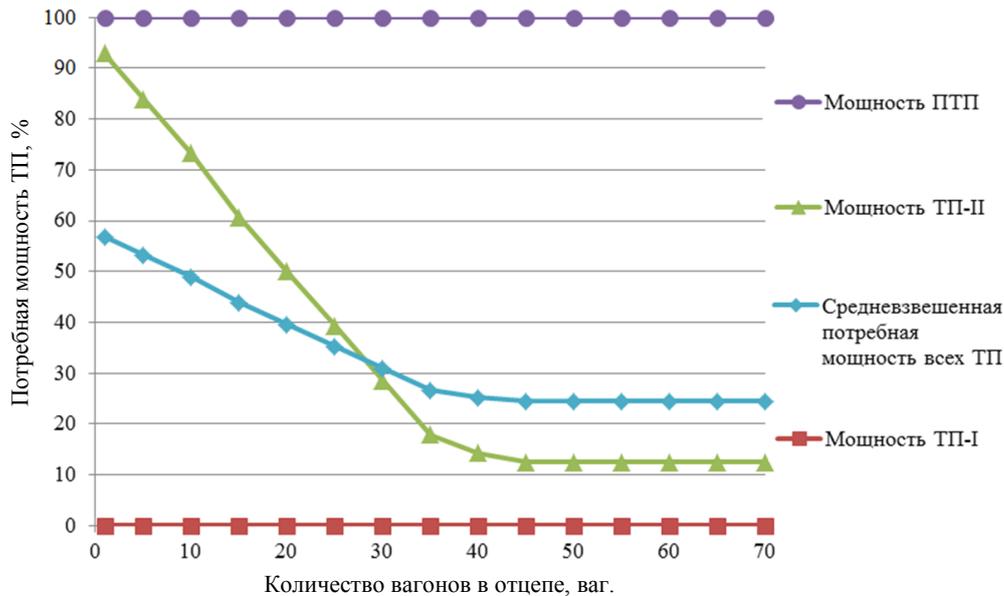


Рисунок 5 – Зависимость потребляемой мощности тормозных средств горки от числа вагонов в отцепе для остановки отцепа на выходе с парковой тормозной позиции

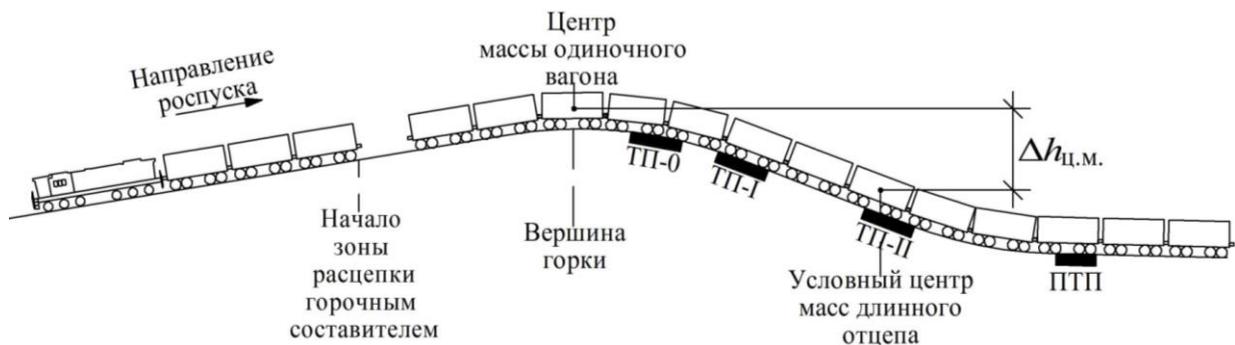


Рисунок 6 – Принципиальная схема для определения условного центра масс многовагонного отцепа

Результаты выполненных исследований показали, что максимально допустимое число вагонов в отцепе зависит от конструкции продольного профиля и технического оснащения сортировочной горки, а также от климатических характеристик местности. Ограничением по допустимому числу вагонов в отцепе может являться не только потребный уровень мощности тормозных средств сортировочной горки, но и общий запас энергетической высоты многовагонного отцепа. Поэтому, кроме проверки мощности тормозных средств горки необходимо выполнять проверку докатывания отцепов из порожних вагонов в сортировочный парк (за пределы ПТП).

Результаты выполненных расчетов по предлагаемой методике для сортировочной горки «Н» подтверждают данное предположение. В качестве ограничения по

максимальному числу вагонов в отцепе используется параметр $P_{\text{док}}$. Результаты расчета для сортировочной горки «Н» представлены в таблице 1 (необходимый уровень вероятности докатывания $P_{\text{док}}$ принят равным 1,0).

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования скатывания отцепов с сортировочной горки «Н» по критерию K_2

$v_{\text{оп}}$, м/с	Число вагонов в отцепе											
	1 ОП		1		30		40		50		60	
	$P_{\text{док}}$	$v_{\text{вых}}$, м/с	$P_{\text{док}}$	$v_{\text{вых}}$, м/с	$P_{\text{док}}$	$v_{\text{вых}}$, м/с	$P_{\text{док}}$	$v_{\text{вых}}$, м/с	$P_{\text{док}}$	$v_{\text{вых}}$, м/с	$P_{\text{док}}$	$v_{\text{вых}}$, м/с
1,0	1,00	1,79	1,00	4,30	1,00	2,61	0,98	1,30	0,09	0,58	0,00	–
1,5	1,00	1,90	1,00	4,35	1,00	2,70	1,00	1,48	0,26	0,59	0,00	–
2,0	1,00	2,05	1,00	4,42	1,00	2,89	1,00	1,84	0,71	0,87	0,00	–
2,5	1,00	2,23	1,00	4,53	1,00	3,09	1,00	2,17	0,98	1,26	0,25	0,64

Использование предлагаемого метода расчета на основе критериев K_1 и K_2 позволит более точно определять ограничения по максимальной длине отцепа, что может привести к увеличению допустимого значения и повышению эффективности работы сортировочных горок. Результаты выполненных исследований для сортировочной горки «Н» (имеющей в настоящее время ограничение по максимальному числу вагонов в отцепе, равное 27) показали следующее:

– многовагонные отцепы из груженых вагонов (с хорошими ходовыми характеристиками) не имеют ограничений по мощности тормозных средств;

– для многовагонных отцепов из порожних вагонов (с плохими ходовыми характеристиками) ограничения по максимально допустимому числу вагонов возникают при числе вагонов в отцепе более 40.

Таким образом, расчет максимально допустимого числа вагонов в отцепе по критериям K_1 и K_2 для эксплуатируемых сортировочных горок может повысить перерабатывающую способность и уровень безопасности роспуска, вследствие сокращения числа расцепок и исключения необходимости выполнения связанных с этим дополнительных технологических операций.

Пятая глава посвящена оценке повышения эффективности существующей технологии роспуска составов на сортировочных горках при изменении максимально допустимого числа вагонов отцепа. Расчет экономической эффективности выполнен с учетом анализа числа остановок роспуска и дополнительных простоев «сверхдлинных» отцепов (отцепов, которые необходимо дополнительно делить из-за превышения установленных значений по максимальной длине). Установлено, что увеличение максимально допустимого числа вагонов в отцепе может привести к следующим эффектам:

- сокращению технологического горочного интервала;
- увеличению средней скорости роспуска;
- увеличению перерабатывающей способности сортировочной горки;
- повышению уровня безопасности сортировочного процесса за счет снижения числа расцепок при делении многовагонных отцепов, снижения вероятности нагонов и соединения отцепов в пределах спускной части горки.

При определении экономической эффективности от реализации мероприятий по изменению максимально допустимого числа вагонов в отцепе учитывалось влияние на технологический горочный интервал изменения числа случаев деления «сверхдлинного» отцепа на части, которое определяется по следующей формуле:

$$\Delta t_{\text{ги}}^{\text{о.р.}} = \bar{n}_{\text{о.р.}} \cdot \bar{t}_{\text{о.р.}}, \quad (5)$$

где $\bar{t}_{\text{о.р.}}$ – среднее время задержки расформирования состава из-за деления «сверхдлинного» отцепа на части, приходящееся на один состав, мин/сост.;

$\bar{n}_{\text{о.р.}}$ – среднее количество остановок роспуска, из-за расцепок «сверхдлинных» отцепов, приходящееся на один состав, ед.

Экономический эффект $\mathcal{E}_{\text{эф}}$ от реализации указанных мероприятий определяется по формуле, р./г.:

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{гл}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ман}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{п}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\text{гл}}$, $\Delta \mathcal{E}_{\text{ман}}$ – изменение эксплуатационных расходов, связанных с выполнением маневровой работы и содержанием парка горочных локомотивов¹;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{п}}$ – изменение эксплуатационных расходов, связанных с занятием станционных путей;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{доп}}$ – изменение расходов в связи с дополнительной переработкой вагонов.

Эффективность предлагаемых мероприятий определена на примере сортировочной горки «Н», для которой уменьшается технологический горочный интервал из-за снижения числа дополнительных остановок роспуска, связанных с делением «сверхдлинных» отцепов на части, в среднем на 0,23 мин/сост. (2,11 %). Установлено, что перерабатывающая способность горки вырастет на 125 ваг./сут (1,95 %).

Экономический эффект определен для варианта использования дополнительной перерабатывающей способности горки «Н» для детальной подборки вагонов для грузовых станций узла, который может достигать от 5,7 до 14,9 млн р./г. Диапазон экономии эксплуатационных расходов по переработке вагонопотоков зависит от себестоимости переработки одного вагона на грузовой и сортировочной станции.

Для сортировочных станций сокращение технологического горочного интервала может также привести к следующим эффектам:

¹ Учитывается при наличии собственного парка локомотивов.

- снижению имеющихся ограничений по перерабатывающей способности;
- освоению дополнительных объемов переработки транзитных вагонов.

Таким образом, предлагаемые изменения технологии расформирования многовагонных отцепов на сортировочных горках, при увеличении максимально допустимого числа вагонов в отцепе, экономически целесообразны, в том числе из-за отсутствия затрат на их реализацию. Кроме того, снижение количества расцепок «сверхдлинных» отцепов приведет к уменьшению вероятности нагона и соударения отцепов на спускной части горки и, как следствие, к повышению безопасности сортировочной работы в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований в диссертационной работе можно сделать следующие выводы:

1. Исторический обзор развития теории проектирования и опыта эксплуатации сортировочных горок показал, что существующие принципы расчета конструктивных и технологических параметров горок базируются на анализе результатов скатывания одиночных вагонов. Этого недостаточно на современном этапе развития, так как в реальных условиях значительная часть вагонопотока перерабатывается в отцепах из нескольких вагонов. Поэтому на стадии проектирования и при определении путей совершенствования технологии работы сортировочных горок целесообразно дополнительно учитывать результаты роспуска многовагонных отцепов.

2. Действующая методика определения максимально допустимого числа вагонов в отцепе содержит ряд допущений, направленных на упрощение процедуры расчета, что может приводить к снижению точности получаемых результатов, в частности: многовагонный отцеп рассматривается в виде материальной точки, не учитываются потери энергетической высоты при преодолении отцепом неуправляемых сил сопротивления движению отцепа, не учитывается распределение массы внутри отцепа, не производится выбор расчетного маршрута и условий скатывания отцепа.

3. Разработана имитационная модель скатывания с сортировочной горки отцепов, учитывающая связи между вагонами внутри отцепа и динамическое изменение сил, действующих на многовагонный отцеп. Данная модель позволяет исследовать положение точки отрыва и динамику скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки, в зависимости от внешних условий, конструктивных и технических особенностей сортировочной горки. Выполненная верификация имитационной модели показала, что расхождение данных имитационного моделирования и численного расчета не превышает 5 %. Данные имитационного моделирования сопоставимы с ре-

зультатами натуральных экспериментов при уровне статистической значимости 0,05. Указанные результаты подтверждают адекватность имитационной модели и достоверность полученных при моделировании результатов.

4. Разработан новый метод расчета максимально допустимого количества вагонов в отцепе основанный на использовании имитационного моделирования процесса скатывания отцепов с сортировочной горки. Установлено, что при определении максимально допустимого числа вагонов в отцепе необходимо рассматривать два критерия: обеспечение достаточной мощности тормозных средств и обеспечение необходимой дальности пробега отцепа в сортировочный парк. Выполненный по предлагаемой методике расчет для эксплуатируемой сортировочной горки показал возможность увеличения максимально допустимого числа вагонов в отцепе с 27 до 40.

5. Разработана методика технико-экономического сравнения вариантов технологии пропуска «сверхдлинных» отцепов через горку, а также методика определения экономической эффективности от реализации мероприятий по изменению максимально допустимого числа вагонов в отцепе. Реализация предлагаемой технологии пропуска многовагонных отцепов через горку не требует дополнительных затрат и позволит увеличить перерабатывающую способность сортировочных горок и станции в целом. Например, для сортировочной горки «Н» прирост перерабатывающей способности составил 1,95 % или 125 ваг./сут. Экономический эффект от реализации разработанных предложений может составить от 5,7 до 14,9 млн р./г. В зависимости от себестоимости переработки одного вагона на грузовой станции узла.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих научных рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Гунбин, А. А. Моделирование процесса скатывания отцепов из нескольких вагонов с сортировочной горки при роспуске / А. А. Климов, А. А. Гунбин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2 (38). – С. 88–91.

2. Гунбин, А. А. Исследование интервалов на разделительных элементах сортировочной горки при скатывании отцепов дифференцированной длины / А. А. Гунбин // Вестник УрГУПС. – 2017. – № 3 (35). – С. 108–117.

3. Гунбин, А. А. Образование временных интервалов на первом стрелочном переводе сортировочной горки при роспуске отцепов дифференцированной длины / А. А. Гунбин // Вестник СГУПС. – 2018. – № 1 (44). – С. 5–13.

Публикации в журналах и научных сборниках:

4. Гунбин, А. А. Алгоритм имитационного моделирования скатывания с горки многовагонных отцепов / А. А. Гунбин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2016. – Т. 1. – С. 334–337.

5. Гунбин, А. А. Анализ структуры вагонопотока нечетной сортировочной системы ст. И / А. А. Гунбин // Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке: сб. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. «Политранспортные системы». – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2017. – С. 321–328.

6. Method for calculating the maximum number of railway cars in a cut [Электронный ресурс] / A. Klimov, A. Gunbin, D. Osipov, P. Burdyak // MATEC Web of Conf. : X International Scientific and Technical Conference “Polytransport Systems”. – 2018. – Vol. 216, № 02011. – Режим доступа: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2018/75/matecconf_pts2018_02011.pdf. – Загл. с экрана.

Свидетельства о регистрации электронного ресурса:

7. Гунбин, А. А. Программа имитационного моделирования скатывания отцепов из нескольких вагонов с сортировочной горки «СКАТ-Отцеп» / А. А. Климов, А. А. Гунбин // Свидетельство о регистрации электронного ресурса ОФЭРНиО № 18663 от 12.11.2012.

8. Гунбин, А. А. Автоматизированный анализ структуры вагонного парка / А. А. Гунбин // Свидетельство о регистрации электронного ресурса ОФЭРНиО №22008 от 14.07.2016.

Основные положения диссертационной работы и результаты проведенных исследований разработаны и получены автором самостоятельно. Статьи [2–5] подготовлены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, вклад автора диссертационной работы заключается в следующем: [1] – разработка моделей скатывания отцепов и работы поглощающего аппарата автосцепки, [6] – разработка модели и алгоритма оценки потребной мощности тормозных позиций, проведение расчетов, анализ и обобщение полученных результатов.

Гунбин Антон Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ СОРТИРОВОЧНЫХ
ГОРОК С МНОГОВАГОННЫМИ ОТЦЕПАМИ**

Специальность 05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 17.06.2019 г.

Формат 60 x 84 1/16

Объем 1 усл. печ. л.

Заказ № 472

Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения»

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66
