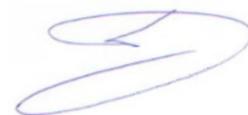


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО СГУПС)

На правах рукописи



Осипов Дмитрий Валентинович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ
ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК**

Специальность 05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
доцент А. А. Климов

Новосибирск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК	12
1.1 Краткий исторический обзор развития конструкции продольного профиля сортировочных горок	12
1.2 Развитие теории и практики проектирования продольного профиля перевальной части сортировочных горок в России	17
1.3 Анализ методов определения положения отцепов в момент их отрыва от состава	24
1.4 Анализ методов оценки проходимости отцепов через перевальную часть горки	30
1.5 Анализ методов оценки фактического состояния продольного профиля перевальной части эксплуатируемых сортировочных горок	35
Выводы по первой главе	38
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРЫВА ОТЦЕПОВ ОТ СОСТАВА НА ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРКИ ПРИ РОСПУСКЕ.....	40
2.1 Разработка аналитического метода определения положения одновагонных отцепов в момент отрыва от состава при роспуске с горки	40
2.1.1 Определение условия отрыва одновагонных отцепов от состава при роспуске	40
2.1.2 Разработка аналитического метода расчета положения одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава	42
2.1.3 Сравнение результатов расчета координат точек отрыва отцепов, определенных различными методами расчета	48
2.2 Определение положения отцепов в момент отрыва от состава при роспуске с использованием имитационного моделирования	49

2.2.1 Разработка имитационной модели для определения положения отцепов в момент их отрыва от состава.....	49
2.2.3 Моделирование отрыва одновагонных отцепов от состава	61
Выводы по второй главе	65
3 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРЫВА ОТЦЕПОВ ОТ СОСТАВА НА ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК	67
3.1 Методика проведения натуральных наблюдений за процессом отделения отцепов на перевальной части горки	67
3.2 Результаты проведения натуральных исследований на эксплуатируемых сортировочных горках.....	72
3.3 Сопоставление результатов натуральных наблюдений и теоретических исследований процесса отрыва отцепов на перевальной части горки.....	74
3.4 Практическое приложение результатов натуральных наблюдений	79
3.4.1 Моделирование процесса разъединения автосцепок при отделении отцепов от состава	79
3.4.2 Уточнение методики расчета сортировочных горок в части определения точек отрыва отцепов от состава.....	85
3.4.3 Моделирование ветрового воздействия	86
Выводы по третьей главе	91
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОДА СЦЕПЛЕННЫХ ВАГОНОВ ПО ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ.....	93
4.1 Общие положения.....	93
4.2 Разработка имитационной модели прохождения сцепленными вагонами перевальной части сортировочной горки.....	95
4.2.1 Определение максимальных значений дополнительного вертикального смещения осей автосцепок смежных вагонов при проходе горба горки.....	95
4.2.2 Расчет вероятности самопроизвольного расцепления вагонов при прохождении сцепленных вагонов по перевальной части сортировочной горки	99

4.2.3 Расчет вероятности прохождения вагонов по перевальной части горки без появления сверхнормативных нагрузок на автосцепное устройство.....	107
4.3 Определение показателей прохода сцепленных вагонов через горб сортировочной горки методом имитационного моделирования	109
4.3.1 Моделирование прохода сцепленных вагонов через горбы проектных сортировочных горок	109
4.3.2 Моделирование прохода сцепленных вагонов через горбы эксплуатируемых сортировочных горок и сопоставление результатов с натурными наблюдениями.....	116
Выводы по четвертой главе	120
5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ	122
5.1 Формулировка задачи.....	122
5.2 Выбор расчетных моделей вагонов для оценки качества продольного профиля перевальной части горки	123
5.3 Разработка методики оценки продольного профиля перевальной части сортировочных горок	126
5.4 Разработка программного комплекса для оценки качества продольного профиля перевальной части горки	130
5.5 Результаты экспериментальных исследований продольного профиля перевальной части эксплуатируемых сортировочных горок	132
5.6 Методика технико-экономического сравнения вариантов продольного профиля перевальной части сортировочных горок.....	136
5.6.1 Оценка влияния продольного профиля перевальной части горки на перерабатывающую способность.....	136
5.6.2 Методика оценки экономического эффекта при сравнении вариантов продольного профиля перевальной части сортировочных горок.....	145
Выводы по пятой главе	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты моделирования прохода сцепленных вагонов различных моделей через горб сортировочной горки.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Пример расчета экономического эффекта выправки перевальной части сортировочных горок «Ч» и «Н»	178
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Пример сравнения вариантов конструкции продольного профиля перевальной части сортировочной горки	184
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельство о регистрации программы «Спуск-2».....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Свидетельство о регистрации программы «Горб горки – Проверка профиля».....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акты о внедрении результатов диссертационной работы	190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сортировочные горки являются важнейшими элементами технологических систем переработки вагонопотоков и во многом определяют эффективность, надежность и результаты их функционирования. В ОАО «РЖД» реализуется Программа совершенствования работы и развития сортировочных станций, в рамках которой проведен комплекс мероприятий по механизации, автоматизации, модернизации путевого развития горок, внедрению новейших технических средств и технологий. Дальнейшая интенсификация переработки вагонов на горках связана с оптимизацией параметров их отдельных элементов.

Важнейшим параметром сортировочной горки является продольный профиль, от конструкции которого зависит производительность и безопасность работы всего сортировочного комплекса. Особое значение имеет перевальная часть горки, где происходит деление состава на отцепы и образование начальных пространственных интервалов между ними, что во многом определяет показатели всего сортировочного процесса, такие как: скорость роспуска, горочный технологический интервал и перерабатывающая способность горки.

Отдельной задачей является обеспечение соответствия параметров продольного профиля эксплуатируемых горок проекту. Возникающие при эксплуатации искажения профиля могут приводить не только к уменьшению производительности горки, но и к снижению уровня безопасности сортировочного процесса. Поэтому одним из важных направлений исследований является определение влияния искажений продольного профиля перевальной части на эксплуатационные свойства горки и определение целесообразности проведения ее выправки, в том числе по экономическим критериям.

В действующих правилах и нормах проектирования сортировочных устройств представлены диапазоны допустимых значений для определения конструктивных параметров перевальной части горок, при этом методов и рекомендаций по определению оптимальных значений не приведено. Таким образом, со-

вершенствование методов расчета параметров перевальной части горок является актуальным направлением научных исследований.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие теории проектирования и совершенствование технологии работы сортировочных горок внесли такие ученые и специалисты, как Е. В. Архангельский, С. А. Бессоненко, В. И. Бобровский, С. П. Бузанов, А. В. Быкадоров, М. Г. Дашков, А. М. Долаберидзе, Ю. И. Ефименко, В. И. Жуков, В. Н. Иванченко, С. В. Карасев, А. М. Карпов, А. А. Климов, В. А. Кобзев, С. С. Мацкель, Ю. А. Муха, Е. В. Нагорный, В. Д. Никитин, В. Е. Павлов, А. И. Павловский, Н. В. Правдин, В. Д. Ратников, 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. Шабельников, В. П. Шейкин, В. Н. Шелухин и др.

Ранее выполненные исследования в основном были направлены на оптимизацию конструктивных и технологических параметров спускной части горок. При этом исследованию процесса прохождения отцепов через горб горки и определению рациональных конструктивных параметров перевальной части уделялось меньшее внимание.

Целью диссертационной работы является совершенствование методов расчета параметров продольного профиля перевальной части сортировочных горок для интенсификации переработки вагонопотоков и повышения безопасности сортировочного процесса.

Для достижения указанной цели потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ современного состояния теории и практики проектирования продольного профиля перевальной части сортировочных горок.
2. Разработать аналитическую и имитационную модели определения положения отцепов в момент их отрыва от состава при роспуске с сортировочной горки.
3. Выполнить исследования процесса отрыва отцепов от состава при роспуске и разработать предложения для совершенствования методики расчета горок.
4. Разработать имитационную модель и исследовать процесс прохождения сцепленными вагонами перевальной части сортировочной горки.

5. Разработать методику определения рационального варианта продольного профиля перевальной части сортировочной горки.

Объект исследования. Линейные предприятия транспортной сети.

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

Методология и методы исследования. Методологической и теоретической основой проводимых исследований являются труды отечественных и зарубежных ученых в области проектирования и эксплуатации сортировочных горок. При решении задач выполнялись сбор и обработка данных о работе сортировочных горок, анализ материалов съемки продольных профилей, проведение натурных наблюдений за сортировочным процессом. Построение имитационных моделей процесса проследования отцепами перевальной части горки выполнено на основе теории расчета и проектирования сортировочных горок с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики. При выполнении работы использовались положения теории планирования эксперимента, теории надежности и методы технико-экономического сравнения вариантов проектных решений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан новый аналитический метод определения положения одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава при роспуске с горки, обеспечивающий точность расчетов, соизмеримую с имитационным моделированием.

2. Предложена методика учета дополнительного сопротивления движению отцепа при разъединении автосцепок смежных вагонов на горбе горки для уточнения положения отцепов в момент их отрыва от состава при роспуске.

3. Разработана новая имитационная модель, позволяющая рассчитывать вероятностные показатели проходимости сцепленных вагонов через горб сортировочной горки при роспуске.

4. Разработана методика определения рационального варианта продольного профиля перевальной части как проектируемых, так и эксплуатируемых сортировочных горок, позволяющая производить сравнение вариантов по эксплуатационным и экономическим критериям.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследований могут быть использованы при корректировке норм проектирования и содержания сортировочных горок.

Использование разработанных методик, аналитических и имитационных моделей позволит повысить уровень обоснования проектных решений при проектировании или реконструкции продольного профиля сортировочных горок.

Разработанные методики и математические модели могут быть использованы для анализа работы эксплуатируемых сортировочных горок и принятия решения о необходимости выправки или реконструкции перевальной части, что позволит получить экономический эффект от уменьшения затрат на проведение маневровой работы, а также повысить уровень безопасности сортировочного процесса.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные практические рекомендации приняты к использованию Западно-Сибирской дирекцией управления движением – структурным подразделением Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД» для оценки конструкции и технологических параметров существующих сортировочных горок. Результаты работы использованы при разработке проектов выправки горбов сортировочных горок. Получены свидетельства о государственной регистрации объектов интеллектуальной собственности:

1. Программа для оценки качества продольного профиля горочных путей «Горб горки – Проверка профиля». Свидетельство о регистрации электронного ресурса ОФЭРНиО №21573 от 29.12.2015.

2. Программа для расчета параметров сортировочных горок методом имитационного моделирования скатывания отцепов «Спуск-2». Свидетельство об отраслевой регистрации разработки ОФАП №7848 от 05.03.2007.

Созданные модели и методики используются в учебном процессе кафедры «Железнодорожные станции и узлы» и научно-исследовательских работах НИЛ «Совершенствование перевозочного процесса» СГУПС.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая и имитационная модели определения положения отцепов

на перевальной части горки в момент отрыва от состава при роспуске.

2. Методика расчета показателей прохождения отцепами через перевальную часть сортировочной горки при роспуске.

3. Методика определения рационального варианта продольного профиля перевальной части сортировочной горки.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность приведенных в диссертации исследований основана на корректном применении основных положений фундаментальных и прикладных наук, методов исследования, что подтверждается соответствием разработанных теоретических положений и результатов расчетов результатам натуральных наблюдений за процессом роспуска составов на эксплуатируемых сортировочных горках. Основные положения диссертационной работы доложены и получили одобрение на научных конференциях: VII Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (СФУ, Красноярск, 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе» (СГУПС, Новосибирск, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Совершенствование технологии перевозочного процесса» (СГУПС, Новосибирск, 2014 г.); IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (СГУПС, Новосибирск, 2016 г.). Результаты диссертационных исследований были представлены и получили одобрение на заседаниях кафедры «Железнодорожные станции и узлы» (СГУПС, Новосибирск, 2010-2016 гг.), научно-технического совета факультета «Управление процессами перевозок» (СГУПС, Новосибирск, 2013, 2016 г.), на расширенном заседании кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» (УрГУПС, Екатеринбург, 2017 г.), на сетевой школе передового опыта ОАО «РЖД» «Прогрессивные методы управления эксплуатационной работой, направленные на выполнение показателей работы сортировочных станций» (ОАО «РЖД», Зап.-Сиб. ж. д., Новосибирск, 2016 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах, в том числе четыре статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных

ВАК Минобрнауки России. Получены свидетельства о регистрации электронного ресурса № 21573 ОФЭРНиО и об отраслевой регистрации разработки № 7848 ОФАП.

Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. Статьи [86–89, 92, 94–96, 100, 101] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [91, 93, 97–99] – разработка моделей и алгоритмов реализации, проведение расчетов, анализ и обобщение полученных результатов; [63] – разработка модели и алгоритма определения положения отцепов при отрыве от состава.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 158 наименований, и шести приложений. Содержание работы изложено на 152 страницах основного текста. Диссертационная работа включает 17 таблиц и 37 рисунков.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК

1.1 Краткий исторический обзор развития конструкции продольного профиля сортировочных горок

Появление сортировочных устройств было связано с потребностью в сортировке вагонов, которая возникла с развитием сети железных дорог в первой половине XIX в. Первоначально сортировочная работа выполнялась на горизонтальных путях методом осаживания, а впоследствии стали применять и подталкивание локомотивом. Наряду с этими способами в ряде стран передвижение отцепов на соответствующие пути выполнялось с использованием конной тяги, например, в России, а в США применялись маневры с помощью шеста [124].

Качественно новый виток развития сортировочных устройств произошел в 1846 г., когда в Германии была построена первая железнодорожная станция на уклоне (Дрезден-Фридрихштадт), на которой маневры по расформированию составов осуществлялись под действием силы тяжести вагонов. Позднее аналогичные станции были сооружены во Франции (Сент-Этьен, 1863 г.) и в Англии (Эдж-Хилл, 1873 г.). В США некоторые станции или отдельные парки также начали проектироваться на уклоне (Гринвиль, Логанспорт, Шеридан и др.) [33, 123]. На таких станциях расформирование составов осуществлялось на сплошном переменном уклоне, на котором выделялись зоны надвига, расцепки и свободного скатывания вагонов.

Основным недостатком в эксплуатации таких станций и парков являлась необходимость расцепки вагонов на уклоне. При выполнении этой операции требовалось сжать состав, для чего приходилось использовать специальные ручные тормозные средства. Это существенно усложняло процесс расформирования, требовало дополнительного времени и, соответственно, снижало перерабатывающую способность всей станции.

В 1876 г. на ст. Шпельдорф (Германия) впервые была сооружена сортировочная горка с выделением надвальной, перевальной и спускной частей как отдельных участков продольного профиля сортировочного устройства. Такая конструкция позволила производить расцепку вагонов во время движения и без использования тормозных средств. Это достигалось за счет наличия в профиле горба – *перевальной части горки*, перед которой надвижная часть располагалась на подъеме (противоуклоне), обеспечивая естественным образом сжатие сцепных устройств состава во время расцепки вагонов. Таким образом, сформировалось основное назначение перевальной части горки, заключающееся в обеспечении удобства расцепки вагонов у вершины, а также плавного проследования подвижным составом горба горки.

Дальнейшее появление в мире станций с сортировочными горками (Терр-Нуар в 1888 г. во Франции, Ртищево в 1889 г. и Кочетовка в 1901 г. в России и т. д.) стало поворотным моментом в истории развития сортировочных устройств и сортировочных станций в целом, который закрепил новую «горочную» технологию в качестве основного способа массовой переработки вагонопотоков [16, 123].

Впоследствии возникла необходимость увеличения производительности сортировочных горок. Дальнейшее развитие горочной технологии было связано с механизацией процесса переработки вагонопотоков.

Первой опытной сортировочной станцией, на которой была осуществлена механизация горки, стала ст. Гамм в Германии (1925 г.). Горка имела одну механизированную тормозную позицию, располагавшуюся перед каждым пучком из семи-восьми сортировочных путей, и одну немеханизированную парковую тормозную позицию, противоуклон со стороны надвальной части был равен 25 ‰. Профиль спускной части был разбит на три элемента: скоростной участок – 36 ‰, промежуточный участок – 15 ‰ и стрелочную зону, располагавшуюся на площадке [16, 112].

Такой тип горок стал основным не только в Германии, но и в других странах Европы. Германская ст. Бремен была оборудована в 1929 г. новой механизированной сортировочной горкой, имеющей летний и зимний продольный профиль

перевальной части. Горка имела высоту 3,50 и 4,30 м, противоуклон 5 и 17 ‰, скоростной уклон 50 и 67 ‰ соответственно для летнего и зимнего горбов, промежуточный участок 15 ‰ и стрелочную зону, располагавшуюся на горизонтальной площадке или уклоне 0,5 ‰. В дальнейшем по образцу германских горок производилось профилирование и механизация других сортировочных горок стран Европы (Англии, Австрии, Голландии, Германии, Дании, Финляндии, Франции, Швейцарии, Швеции и др.).

Новый тип механизированной горки с «вершинными» замедлителями был впервые введен в эксплуатацию в 30-х годах XX в. на ст. Дюмбург-Гохфельд-Южная в Германии. Горка имела две механизированные тормозные позиции и одну немеханизированную парковую позицию. «Вершинные» замедлители частично освобождали паровоз от работы на горке. Однако такой тип механизированных горок в дальнейшем распространения не получил [112].

Конструкция горок в США отличалась от европейских наличием большого количества переломов продольного профиля, более пологими спусками, большей высотой горки и большим количеством замедлителей. Механизированные горки в США имели противоуклон 15–30 ‰, скоростной уклон 25–40 ‰, несколько промежуточных участков и стрелочную зону, располагающуюся на уклонах до 3 ‰, а также три-четыре тормозные позиции. Широко применялась ступенчатая конструкция продольного профиля [121, 147, 148].

Причиной возникновения двух типов конструкции горок (немецкой и американской) является то, что в США был в основном большегрузный и многоосный подвижной состав с автоматической сцепкой, между тем как в Германии и других странах Европы был смешанный вагонный парк, в основном без автосцепки, с обладающим количеством вагонов малой грузоподъемности. Кроме того, в Германии и Европе основной задачей было повышение пропускной способности горок за счет увеличения скорости роспуска, а в США – снижение материальных затрат за счет ликвидации тормозных кондукторов и укладчиков тормозных башмаков.

Продольный профиль перевальной части, в зависимости от месторасположения вершины горки, проектировался по двум вариантам. На большинстве горок

перевальная часть сортировочной горки проектировалась на путях надвига за пределами парка приема. Однако на ряде станций перевальная часть находилась непосредственно в пределах парка приема.

В первом варианте сопрягающие кривые на горбе горке устанавливались, как правило, наименьшего радиуса¹, достаточного для пропуска большинства моделей вагонов различных типов, за исключением некоторых длиннобазных моделей вагонов и сцепов, которые пропускались в обход горба горки по специальному пути. Во втором варианте радиусы сопрягающих кривых горба горки должны были обеспечивать возможность пропуска всех типов вагонов (включая транспортеры) и устанавливались по минимально возможному радиусу, равному 750 м. Впоследствии второй вариант распространения не получил [33].

В России сортировочная горка впервые была сооружена на ст. Ртищево в 1889 г., затем, в 1901 г., – на ст. Кочетовка. За период с 1908–1910 гг. в Московском железнодорожном узле были построены сортировочные горки на ст. Лосиноостровская, Люблино, Ховрино, Перово. К 1917 г. были введены в эксплуатацию уже 10 немеханизированных сортировочных горок, а к 1933 г. количество станций с немеханизированными горками увеличилось до 35 [16].

К 1934 г. в СССР появился собственный проект механизированной сортировочной горки, реализованный на ст. Красный Лиман, особенностью которого стала параболическая форма горочного профиля с двумя тормозными позициями на спускной части [73]. В дальнейшем большинство советских горок было построено по этому типу. Первые механизированные горки в СССР имели противоклон 7–20 ‰, скоростной уклон 30–40 ‰ (ограниченный по конструкции советских паровозов [126]²), несколько промежуточных уклонов и стрелочную зону, располагающуюся на уклонах до 2,5 ‰ [119]. К 1940 г. было механизировано 36 горок. Минимальный радиус вертикальных кривых для перевальной части горок был установлен 250 м.

¹ Например, в Германии на большем протяжении XX века минимальный радиус принимался равным 300 м. ОСЖД и МСЖД рекомендовали конструировать новые вагоны для минимального радиуса сопряжения 250 м, в связи с чем в настоящее время в большинстве стран в качестве минимального радиуса вертикальных кривых на горках установлено это значение.

² Уклон 40 ‰ ограничивался из-за опасности поджога на более крутых уклонах потолков топок паровозов.

В дальнейшем начался этап автоматизации горок, что совместно с появлением нового подвижного состава привело к некоторым изменениям плана и продольного профиля, в том числе и конструкции перевальной части.

В настоящее время на железных дорогах Европы наиболее типичным является применение так называемой «немецкой» схемы сортировочной горки [85, 102]. Для таких горок характерен следующий вид продольного профиля: противоуклон 20–30 ‰, крутой скоростной уклон 45–65 ‰, промежуточные уклоны 10–30 ‰, стрелочная зона и сортировочные пути на уклоне до 2,5 ‰. Минимальный радиус вертикальных кривых, сопрягающих элементы профиля, установлен на сортировочных горках Евросоюза следующим [153]:

– для колеи 1435 мм радиус вертикальной кривой на горбе горки 250 м, на остальной части горки 300 м;

– для колеи 1520 мм радиус вертикальной кривой на горбе горки 350 м, на остальных части 250 м (за исключением Словакии, где радиус вертикальной кривой на горбе горки установлен равным 300 м).

Для горок США в настоящее время характерен следующий профиль: противоуклон до 30 ‰, первый скоростной элемент с уклоном 30 ‰ с размещенной на нем позицией для взвешивания вагонов, следующий элемент, как правило, имеет больший уклон – 40–50 ‰, промежуточные уклоны проектируются в зависимости от дальнейшего снижения высоты горки с учетом принятого профиля в стрелочной зоне, уклон которого устанавливается, учитывая необходимость компенсации сопротивления от кривых участков пути. Перевальная часть проектируется исходя из требования обеспечения достаточного нижнего зазора (клиренса) при проходе горба горки перерабатываемыми вагонами. При этом на горбе горки допускается проектировать вертикальные кривые параболического типа [155–157].

В ряде стран, например, в Австралии, проектирование вертикальной кривой минимального радиуса на горбе горки допускается только при условии сооружения перевальной части из железобетонных плит. Данное требование обосновывается необходимостью исключения возможности уменьшения радиуса вертикальной кривой в процессе эксплуатации до значения менее нормативного [154].

1.2 Развитие теории и практики проектирования продольного профиля перевальной части сортировочных горок в России

С развитием сортировочных устройств и технологии сортировочной работы совершенствовалась и теория их расчета. В конце XIX в. появляются первые научные исследования по организации сортировочной работы и проектированию горок. Основное внимание уделялось расчету высоты горки, а для определения уклонов надвижной и спускной частей горки обычно приводились указания преимущественно эмпирического характера. В. Л. Арнольд вывел общее уравнение движения отцепов и, исследуя его, пришел к выводу, что идеальная форма профиля – циклоида [3]. Основные положения о высоте и профиле сортировочных горок разработал А. Н. Фролов в 1906 г. [144]. В 1910 г. Г. Д. Дубелир разработал и впервые предложил графический метод расчета и проверки профиля сортировочных горок [48], который позднее Е. А. Гибшман значительно усовершенствовал [25]. В 1916 г. В. Н. Образцов разрабатывает графоаналитический метод расчета и проверки профиля сортировочных горок [17].

Таким образом, в 20–30-х гг. XX в. были сформированы основные положения теории и практики проектирования сортировочных горок. Эти положения постоянно усовершенствовались и развивались с учетом современных требований к устройству, оборудованию и организации работы сортировочных горок. Многие из этих положений в той или иной мере используются в существующей методике проектирования сортировочных горок.

Значительный вклад в развитие теории проектирования и совершенствование технологии работы сортировочных горок внесли такие ученые и специалисты, как Е. В. Архангельский, С. А. Бессоненко, В. И. Бобровский, С. П. Бузанов, А. В. Быкадоров, М. Г. Дашков, А. М. Долаберидзе, Ю. И. Ефименко, В. И. Жуков, В. Н. Иванченко, С. В. Карасев, А. М. Карпов, А. А. Климов, В. А. Кобзев, С. С. Мацкель, Ю. А. Муха, Е. В. Нагорный, В. Д. Никитин, В. Е. Павлов, А. И. Павловский, Н. В. Правдин, В. Д. Ратников, 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. Шабельников, В. П. Шейкин, В. Н. Шелухин и др.

Основное внимание в исследованиях уделялось оптимизации конструктивных и технологических параметров спускной части горки, которые в значительной степени определяют безопасность и эффективность сортировочного процесса. В то же время вопросы исследования процесса прохождения отцепов через горб горки и определения рациональных конструктивных параметров перевальной части горки проработаны в меньшем объеме.

Основные этапы развития норм проектирования перевальной части горки в хронологическом порядке представлены ниже [87].

1. Развитие конструкции продольного профиля перевальной части во многом определялось техническим прогрессом в вагоностроении. До начала переоснащения подвижного состава СССР в 1935 г. с винтовой упряжи на автоматическую сцепку СА-3 (ИРТ-3) вопрос о саморасцеплении вагонов при проходе горба горки не ставился в принципе. Минимальный радиус вертикальных кривых на перевальной части горки проектировался исходя из условия вертикального вписывания наиболее длинного экипажа, проходящего через горку. Поэтому расчетный радиус кривых составлял 200–250 м [59, 74, 83, 112, 119].

2. На перевальной части советских сортировочных горок, как правило, было два горочных пути надвига с различной высотой вершин горба горки вследствие больших перепадов температур в течение года. Зимний горб горки был выше летнего для преодоления дополнительного сопротивления вагонов при низких температурах. На отдельных станциях (в том числе при одном пути на горбе), перед наступлением зимы осуществлялась временная подъемка горбов путем удлинения спускной части в сторону парка приема, либо за счет увеличения ее уклона или совместным применением обоих способов [72]. Также практиковалось наращивание горба зимней горки на период сильных морозов на 20–25 см путем подъема его на нашпальники [126]. С появлением подвижного состава на подшипниках качения потребность в наличии зимнего и летнего горбов отпала, поэтому горбы го-

рок проектируются, как правило, в одном уровне, соответствующем зимним условиям работы.

3. При внедрении автосцепки, для сокращения случаев повреждения автосцепных устройств вагонов и их саморасцепа, требования к профилю перевальной части изменились, что нашло отражение в новом нормативном документе «Технические указания на проектирование станций и узлов» (ТУПС-48), вышедшем в 1948 г. [129]. Были установлены наименьшие радиусы вертикальных кривых при сопряжении уклонов на горбе горки: в сторону надвижной части – не менее 350 м, а в сторону спускной части и на остальных ее элементах – не менее 250 м. Уклон подъема перед горбом горки должен был быть не менее 8 ‰, а первый элемент скоростного участка горки следовало проектировать возможно более крутым, но не более 40 ‰. Также было указано, что алгебраическая разность сопрягаемых уклонов на горбе горки не должна превышать 55 ‰ во избежание саморасцепа вагонов. Данные требования сохранились и в последующей редакции ТУПС-54 [130].

4. Следующее изменение норм произошло в ТУПС-61 в связи с внедрением новых видов тяги горочных локомотивов [131]. Максимальная крутизна первого элемента скоростного участка горки была увеличена до 50 ‰ при работе тепловозов и электровозов, но оставалась не круче 40 ‰ при сохранении на горке паровозов. В связи с этим, при сумме сопрягаемых уклонов на горбе горке более 55 ‰, во избежание саморасцепа вагонов необходимо было устраивать на горбе горки площадку длиной, равной длине базы вагона.

5. Завершение оборудования существующего парка вагонов автосцепкой к 1957 г. сопровождалось внедрением новых конструкций вагонов, что привело к росту случаев саморасцепа вагонов и повреждения автосцепных устройств при проходе горба горки длиннобазными вагонами. Это нашло отражение в документе «Изменения и дополнения № 1» 1965 г. к ТУПС-61 [132]. Наименьший радиус вертикальной кривой при сопряжении уклонов на перевальной части в сторону спускной части был увеличен на новых горках с 250 до 350 м, что привело к значительному снижению случаев саморасцепа и повреждения вагонов на таких горках.

6. Дальнейшее пополнение парка восьмиосных и длиннобазных вагонов привело к увеличению случаев несвоевременного отрыва отцепов из-за защемления расцепленных автосцепок на горбе горки. В результате этого в вышедшей в 1978 г. Инструкции по проектированию станций и узлов (ИПСУ-78) для облегчения разъединения расцепленных автосцепок рекомендовалось устраивать между тангенсами сопрягающих вертикальных кривых на горбе горке площадку, равной длине базы вагона (но не менее 19 м, что соответствовало наибольшей колесной базе восьмиосного вагона) [57]. В этой связи максимальная крутизна первого элемента скоростного участка горки была увеличена до 55 ‰. Выделился отдельным нормативом второй вариант профиля надвижной части (подъем перед горбом горки, в целях повышения эффективности роспуска составов с переменной скоростью, рекомендовано было проектировать на уклоне 12–16 ‰ на протяжении 100–150 м). Наименьшие радиусы вертикальных кривых на перевальной части следовало устанавливать на всех горках равными 350 м, что практически исключило возможность саморасцепа и сверхнормативных нагрузок на автосцепки у основной части парка вагонов того времени.

7. Изменение норм проектирования в ИПСУ-78 улучшило ситуацию с проходимостью длиннобазных вагонов через горб горки, однако усугубило проблемы с несвоевременным отрывом и нерасцепами других вагонов. Поэтому в связи с усовершенствованием автосцепки СА-3 и оборудованием восьмиосных вагонов новыми автосцепками СА-3М и т. п., параметры сопряжения были вновь изменены, что нашло отражение в Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств 1992 г. [2, 109]. Для улучшения отделения отцепов наименьший радиус вертикальной кривой при сопряжении элементов профиля на перевальной части в сторону спускной части был уменьшен с 350 до 250 м. С этой же целью впервые установлено ограничение на наибольший радиус, который должен быть на горбе горки не более 300 м со стороны спускной части и не более 400 м со стороны надвижной части. Кроме этого, были скорректированы нормы проектирования продольного профиля перевальной части с наличием разделительного элемента, минимальная длина которого была уменьшена с 19 до 10 м, появилось требование

о его расположении на подъеме (противоуклоне крутизной не менее 5 ‰) вместо площадки. Данные изменения были внесены с целью повысить безопасность сортировочного процесса для предотвращения самопроизвольного скатывания отцепов при экстренной остановке роспуска. В результате этого из-за ограничения суммарной крутизны сопрягаемых на горбе горки уклонов, равной 55 ‰, максимальный уклон первого элемента скоростного участка спускной части был уменьшен с 55 до 50 ‰. Суммарная крутизна примыкающего к разделительному элементу участка надвигной части и скоростного элемента впервые была ограничена 70 ‰. Также с 1992 г. нормативы стали регламентировать значения допускаемых искажений профиля элементов горки, в том числе перевальной части.

8. Уменьшение минимального радиуса сопрягающей вертикальной кривой со стороны спускной части с 350 до 250 м, а также ограничение максимальных радиусов позволило улучшить условия отрыва отцепов на горбе горки, но вновь привело к увеличению случаев саморасцепа и повреждения вагонов. Несмотря на данное обстоятельство, с 1992 г. по настоящее время каких-либо изменений, касающихся норм проектирования и содержания перевальной части горки, в нормативные документы внесено не было.

9. В настоящее время действующими нормативными документами при проектировании перевальной части горки являются Правила и нормы проектирования сортировочных устройств в редакции 2003 г. [110], а также СП 225.1326000.2014 «Станционные здания, сооружения и устройства» [125], устанавливающие одинаковые требования к продольному профилю горки. Согласно этим документам в продольном профиле горки выделяются: надвигная часть; перевальная часть (горб горки); спускная часть и сортировочные пути.

Границами перевальной части горки являются: со стороны надвигной части – начало сопрягающей вертикальной кривой на горбе горки или профильном разделительном элементе; со стороны спускной части – конец сопрягающей вертикальной кривой горба горки.

Предусматривается два варианта продольного профиля перевальной части горки [110]:

- без профильного разделительного элемента (при суммарной крутизне сопрягаемых на горбе уклонов надвижной и спускной частей Δi не более 55 %);
- с профильным разделительным элементом (при суммарной крутизне сопрягаемых на горбе уклонов надвижной и спускной частей Δi более 55 %, но менее 70 %, при этом суммарная крутизна уклонов профильного разделительного элемента и скоростного элемента не должна превышать 55 %).

Минимально допустимые значения радиусов вертикальных кривых определяются условиями прохода вагонов с неблагоприятными параметрами (в частности, вагонов для перевозки автомобилей, легковесных грузов, изотермических и других длиннобазных вагонов) в сцепленном состоянии без повреждения автоцепных устройств и их самопроизвольного расцепления. Увеличение радиуса вертикальной кривой в зоне вершины горки ухудшает условия отделения отцепов от состава, что может вызывать нарушение технологии роспуска. Исходя из этого, установлены максимальные радиусы вертикальных кривых (400 м со стороны надвижной части и 300 м со стороны спускной части) [107].

Таким образом, основные эксплуатационные требования, предъявляемые к продольному профилю перевальной части горки, в настоящее время можно сформулировать следующим образом:

- обеспечение прохода без саморасцепа всех типов вагонов, перерабатываемых на горке (за исключением вагонов, пропускаемых в обход горба);
- обеспечение прохода сцепленных вагонов без превышения допустимых силовых взаимодействий в элементах вагонов;
- обеспечение безопасного прохода сцепов с длинномерными грузами с опорой на смежные вагоны без повреждения груза и вагонов;
- обеспечение безопасного прохода перспективных сочлененных вагонов с исключением вероятности повреждения вагонов и грузов;
- обеспечение образования пространственно-временных интервалов между смежными отцепами, достаточных для обеспечения безопасных условий роспуска и наибольшей перерабатывающей способности горки;

- обеспечение надежного разъединения и быстрого отделения отцепов от состава для минимизации вероятности появления «нерасцепов» и «утягиваний» отцепов;
- минимизация вероятности самопроизвольного ухода с горба горки уже расцепленных отцепов при прекращении роспуска состава;
- возможность расформирования составов с использованием дифференцированной (переменной) скорости надвига;
- возможность эффективной и безопасной работы с многовагонными отцепами;
- сохранение эффективности и безопасности процесса расформирования при наличии максимально допустимых искажений профиля пути в процессе эксплуатации.

Указанные требования можно разделить на две группы:

- обеспечение безопасного прохождения подвижного состава через горб горки и предотвращения его самопроизвольного расцепления;
- обеспечение максимальной скорости роспуска и, как следствие, наибольшей перерабатывающей способности.

Улучшение показателей одной группы требований может приводить к ухудшению показателей другой. Например, уменьшение количества саморасцепов и случаев повреждения автосцепных устройств вагонов, облегчение прохода длиннобазных вагонов и разъединения их автосцепок обеспечивается при пологой перевальной части, образуемой сопрягающими кривыми увеличенных радиусов. При этом ухудшаются условия разъединения и отрыва короткобазных вагонов, нарастает вероятность «утягивания» одного отцепа другим при несвоевременном разъединении автосцепок после их расцепления, в значительной мере рассеиваются координаты точек отрыва одиночных вагонов от состава и увеличивается риск нагона одних отцепов другими, уменьшается скорость роспуска и, соответственно, производительность горки в целом.

Правилами и нормами [110, 125] допускается некоторая свобода выбора параметров продольного профиля и плана перевальной части. От выбора данных

параметров зависит, насколько эффективно и безопасно будет функционировать запроектированная сортировочная горка. Выбор оптимальной конструкции перевальной части горки – сложная многофакторная и многовариантная задача.

Наиболее значимые исследования конструкции перевальной части сортировочной горки производятся по следующим двум основным направлениям:

- исследования процесса отрыва отцепов от состава;
- исследования проходимости вагонов и сцепов через горб горки.

В свою очередь, исследования по указанным направлениям могут производиться для поиска оптимальных проектных конструктивных параметров горбов горок, а также для оценки качества фактического продольного профиля (конструкции) горочных путей перевальной части эксплуатируемых или проектируемых сортировочных горок.

1.3 Анализ методов определения положения отцепов в момент их отрыва от состава

Точное определение положения точек отрыва отцепов от состава является важным элементом в решении многих задач, возникающих при проектировании плана и продольного профиля спускной части сортировочной горки. Это задачи определения интервалов между отцепами, времени и скорости скатывания, выбора места размещения первых разделительных элементов, а также обоснования уклонов и радиусов сопрягающих вертикальных кривых на перевальной части горки.

Первоначально точкой отрыва вагонов считалась расчетная вершина горки, т. е. точка пересечения профильной линии скоростного уклона с горизонтальной линией, проходящей через вершину горки. В дальнейшем положение отцепа в момент его отрыва от состава стали определять такой его позицией на горбе горки, при которой возникало равенство всех замедляющих и ускоряющих сил, действующих на вагоны. Такое представление сохраняется и по настоящее время.

Развитие методов расчета положений точек отрыва отцепов от состава происходило под влиянием изменений в представлении расчетной модели вагонов и более точного учета факторов, действующих на отцеп на перевальной части [86].

Изначально вагон рассматривался как материальная точка. Удельная движущая сила, действующая на вагон, принималась численно равнозначной величине наклона продольной оси вагона, равной уклону участка пути, по которому движется центр тяжести вагона. Считалось, что если вагон движется по выпуклому участку профиля, то свободное скатывание начинается в тот момент, когда величина наклона продольной оси вагона численно превысит его суммарное удельное сопротивление движению. В первых работах для определения расстояния от вершины горки до точки отрыва пользовались приближенной формулой, включающей в себя только основное удельное сопротивление и радиус сопрягающей вертикальной кривой на горбе горки [122]. К 30-м годам XX в. в расчетах положения отцепов в момент их отрыва стали учитывать уже все виды известных на тот момент удельных сопротивлений движению вагонов [17, 25, 64].

Общее решение задачи определения точки отрыва как для одновагонных, так и для многовагонных отцепов появляется в труде Ф. В. Пугачевского [112]. Решение уравнения равновесия сил, действующих на отцеп, производилось итерационным способом, что позволило учитывать неравномерное распределение массы по длине многовагонного отцепа. Этому методу, как и всем предшествующим, свойственен следующий недостаток: в результате того, что движение вагона отождествлялось с движением материальной точки по профилю горба горки, при расчете возникает существенная погрешность определения наклона кузова и, как следствие, значительное отклонение расчетного значения положения точек отрыва от результатов натурных наблюдений.

Одновременно с аналитическими методами решения широко применялись и графические методы определения положения многовагонных отцепов в момент их отрыва от состава. Е. А. Гибшман графическим методом определял точку отрыва равномерно нагруженного отцепа исходя из изменения средневзвешенного уклона отцепа при последовательном его перемещении по горбу горки [25]. Данному методу была свойственна относительная простота, но, как следствие, недостаточно высокая точность. Более точный графический метод Н. О. Рогинского, основанный на построении линии энергетических высот на профильных элемен-

тах перевальной части горки для отцепов из нескольких вагонов, на практике в свое время практически не применялся из-за высокой трудоемкости и наличия погрешностей в расчетах, в особенности для длинных отцепов [113].

В 1950-е гг. в работах Г. И. Запорожца [53, 54, 116] были предложены формулы расчета положения точки отрыва отцепов, учитывающие все геометрические параметры продольного профиля перевальной части горки. При определении наклона продольной оси кузова одновагонный отцеп рассматривался уже не как материальная точка, а как опора, равная длине базы вагона, что значительно увеличивало точность расчета. Однако при расчете угла наклона продольной оси для четырехосных и восьмиосных вагонов не учитывалась тележечная схема их ходовых частей, что вносило некоторую погрешность в вычисления. Расчет точки отрыва многовагонных отцепов по формуле производился только при условии равномерного распределения массы отцепа по всей его длине.

Учеными ВЗИИТа также разработана методика аналитического определения точек отрыва одновагонных отцепов на основе представления модели вагона как опоры, равной длине базы вагона [50]. В труде [13] предложены приближенные формулы расчета для двух типов продольного профиля горба горки, отвечающие требованиям ИПСУ-78 [57]. Особенностью метода является замена очертания вертикальной сопрягающей кривой ломаной линией, близкой к этой кривой.

В труде [5] М. М. Бакалова для одновагонных и многовагонных отцепов при составлении уравнения равновесия в момент их отрыва от состава предложена осевая модель отцепов, которая впоследствии стала широко использоваться при имитационном моделировании [1, 75]. Однако для аналитического определения точек отрыва отцепов этот метод в силу своей сложности распространения не получил.

В дальнейшем, такие известные ученые, как С. П. Бузанов, А. М. Карпов, Ю. А. Муха и ряд других развивают аналитический метод Г. И. Запорожца и в своих трудах [16, 80] предлагают рассчитывать точку отрыва многовагонных отцепов в момент равновесного распределения профильных сил и сил сопротивления движению на элементах продольного профиля горки по длине отцепа. Кроме исследования равномерно нагруженных отцепов, рассматриваются также вариан-

ты неравномерно нагруженных отцепов с тяжелыми вагонами в хвосте или голове. Данный метод обеспечивает достаточно точный результат для равномерно нагруженного отцепа, но обладает низкой достоверностью результатов для неравномерно нагруженных отцепов из-за усреднения многих параметров при расчете.

Ученый НИИЖТа А. В. Быкадоров в своих исследованиях [19, 23] предлагал графический метод определения положения многовагонных отцепов в момент их отрыва на основе изменения средневзвешенного уклона отцепа в зависимости от его положения на перевальной части горки. Автор использовал следующие допущения: профиль горба горки очерчен отрезками прямых, длина и уклон которых соответствуют протяженности и крутизне противоуклона, разделительной площадки и скоростного элемента; вагоны в отцепе представляются как материальные точки. Метод дает довольно точные результаты, но также только для равномерно нагруженных отцепов. В других своих работах [20, 21, 22] А. В. Быкадоров предлагал аналитический метод расчета положения многовагонных отцепов в момент отрыва от состава, заменяя суммарную профильную силу, действующую на отцеп, на уравнения двух кривых второго порядка и решая их относительно полного удельного сопротивления. В результате была разработана приближенная методика расчета, пригодная для определения точки отрыва как для равномерно, так и для неравномерно нагруженных отцепов.

В работе [15] Н. И. Брехова определяется положение точки отрыва для длинных многовагонных отцепов с использованием уравнения равенства разности высот на надвижной и спускной частях, располагающихся на них фрагментов отцепа, и энергетических высот на преодоление сопротивления движению. Недостатком такого подхода является невозможность проведения исследований с неравномерно нагруженными отцепами, а также недостаточно высокая точность расчета.

М. Г. Дашков в работе [42] получил формулы расчета точек отрыва одиночных вагонов для двух типов продольного профиля горба горки, отвечающих требованиям ИПСУ-78 [57]. Положение вагона при отрыве определяется, как и в методе Г. И. Запорожца, в момент, когда уклон осевой линии автосцепок превысит значение величины удельного сопротивления движению. Приведенные в данном

туде уравнения учитывают тележечную схему ходовых частей четырехосных вагонов.

Использование методов расчета, в которых отрыв одновагонных отцепов определяется через наклон их продольной оси и его сравнением со значением суммарного удельного сопротивления движению, было широко распространено и встречается при выполнении горочных расчетов в настоящее время [55, 152].

Качественно новым этапом развития теории скатывания отцепов с горки стал переход от аналитических и графоаналитических методов расчета к методам имитационного моделирования, т. е. решения дифференциального уравнения движения отцепов итерационными методами. Одними из первых появились работы В. К. Буяновой [18], С. С. Мацкеля [71] и Е. М. Шафита [149, 150], ориентированные на моделирование на ЭВМ процесса роспуска вагонов методом последовательного дискретного перемещения отцепов. Однако уровень погрешности расчетов оставался достаточно высоким из-за того, что моделирование процесса скатывания отцепа – сложная многофункциональная математическая задача, при решении которой необходимо учесть множество переменных величин, в том числе случайных. Это значительно увеличивало трудоемкость выполняемых работ, которая часто превышала возможности ЭВМ того времени.

С ростом возможностей вычислительной техники появились имитационные модели процесса расформирования составов с высоким уровнем адекватности реальным условиям, что позволило выполнять на них многовариантные экспериментальные исследования, в том числе определять положения отцепов в момент их отрыва от состава [10, 14, 56, 63]. Большой вклад в реализацию и развитие данных моделей внесли такие ученые, как Ю. А. Муха, В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, В. Е. Павлов, А. И. Павловский, Б. А. Родимов и др. [1, 11, 12, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 114]. Заложенные ими принципы и алгоритмы расчета легли в основу существующей теории расчета сортировочных горок.

В данных работах была предложена более совершенная модель отцепа: при определении профильных сил принята система шарнирно соединенных материальных точек, расстояния между которыми равны расстояниям между соответствующими осями отцепа, а сила тяжести, сосредоточенная в каждой точке, равна

нагрузке на соответствующую ось отцепа [1]. При расчете сил сопротивлений движению вагонов широко использовались методы теории вероятностей и математической статистики, позволяющие получать результаты, учитывающие случайный характер исследуемого процесса. Стало возможным нахождение суммарного воздействия сил сопротивления, действующих на вагон, как функции от ряда случайных величин, каждая из которых имеет определенный закон распределения [65, 68, 98, 102, 120, 136, 137, 142].

Таким образом, анализ работ, посвященных определению координат точек отрыва отцепов от состава, показал, что существующие методы основаны на расчетах с использованием удельных сил сопротивления, полученных ранее опытным путем ЦНИИ МПС [102, 120]. В своих трудах (например, [139] и др.) Х. Т. Туранов предлагает выполнять расчет сил сопротивления движению на основе классических положений теоретической механики. Полученные аналитические зависимости являются новым этапом развития теории динамики скатывания вагона, которая развивается и в настоящее время [140, 141].

Кроме этого, в ряде работ рассматривался вопрос учета дополнительного сопротивления движению вагона при прохождении перевальной части горки. Сравнение результатов теоретических расчетов и натуральных наблюдений за отрывом отцепов от состава на горбе горке неоднократно выполнялось специалистами. Полученные результаты в основном сводятся к констатации факта, что при пропуске составов зачастую возникают проблемы со своевременным отрывом отцепов [10, 47, 55, 107, 108] и др. Делаются выводы, что фактическое положение отцепов в моменты их отрыва зачастую не соответствует расчетным координатам, определенным теоретическим путем как графическими и аналитическими методами, так и имитационным моделированием. Основной причиной этого называется дополнительное усилие на разъединение заземленных автосцепок, которое, как указывается в работах [47, 55], может достигать значений 20 Н/кН и более. Однако данное явление и его учет в горочных расчетах остается не в полной мере исследованным.

Учет дополнительного усилия на разъединение автосцепок предлагается в работе [107]. Для проверки варианта исследуемого продольного профиля произ-

водится расчет показателей работы горки с учетом задержки отрыва очень плохого бегуна (ОП) в связи с защемлением автосцепок. Данное усилие в указанном источнике принимается равным 220 кгс, что составляет 10 кгс/тс для ОП бегуна массой 22 т.

Таким образом, существующие методы расчета положения отцепов в момент их отрыва от состава при роспуске имеют погрешности. Кроме того, использование только нормативных видов сопротивлений движению вагона при рассмотрении процесса прохождения отцепами горба горки является недостаточным.

1.4 Анализ методов оценки проходимости отцепов через перевальную часть горки

Первые научные исследования по проверке проходимости сцепленных вагонов через перевальную часть горки появились примерно в то же время, когда началась внедряться автосцепка в СССР, в 40–50-х годах XX в. Во всех трудах, которые появились в то время, приводились данные преимущественно эмпирического характера. Позже появились фундаментальные работы. В 1960 г. был издан труд ЦНИИ МПС [24], в методике которого предусматривался анализ изменения вертикальных смещений центров автосцепок и угловых вертикальных поворотов продольных осей вагонов путем расчета этих показателей в последовательных позициях сцепа на рассматриваемом профиле перевальной части горки и сравнения их с допускаемыми значениями. Расчет положения вагона на горбе горки в данной методике производился без учета количества осей вагона.

В 1962 г. выходит труд ученых МИИТа [51, 52], где вышеописанный расчетный метод развит и преобразован в графоаналитический. Этим методом оценку проходимости сцепа вагонов рекомендуется производить по максимальной величине относительного вертикального смещения осей автосцепок, получаемой при проходе сцепа по горбу горки, уменьшенной на величину подъема автосцепки в пределах до упора ее хвостовика в верхнюю кромку розетки. Но, учитывая знакопеременный характер действия продольных сил в сцепе, уменьшение относи-

тельного вертикального смещения на эту величину следует рассматривать как явление возможное, но не обязательное [127].

В 1963 г. выходит труд В. Н. Максимова [70], в котором предлагается аналитический метод для определения возможности прохода вагонов по сортировочным горкам без саморасцепа и расчета величины силового взаимодействия в деталях сцепленных вагонов. Автор определял относительное вертикальное смещение автосцепок при проследовании перевальной части горки по уравнениям движения пятниковых точек вагонов. Этот метод является упрощенным, так как основан на ряде допущений при расчете положений пятниковых точек вагона, влияющих на точность результата.

В 1971 г. издается труд ЦНИИ МПС под редакцией Ю. А. Хапилова [127], в котором аналитический метод В. Н. Максимова развивается и значительно перерабатывается. Найдено точное аналитическое решение в общем виде для определения относительных вертикальных смещений центров автосцепок и угловых поворотов их осей для сцепленных вагонов, проходящих по перелому профиля пути. Также автором производится обоснование расчетной величины нормативного допускаемого вертикального смещения осей автосцепок типа СА-3 (180 мм) по наиболее ожидаемому техническому состоянию автосцепок подвижного состава. В частном решении, в отличие от метода В. Н. Максимова, при определении траектории движения пятниковых точек впервые используются аналитические выражения, учитывающие тележечную схему ходовых частей вагонов. Полученные выражения использовались до настоящего времени при расчетах проходимости горбов горок проектируемым подвижным составом [84]. Недостатком работы [127] является наличие расчетных формул только для одного варианта конструкции профиля перевальной части горки согласно ТУПС-61 [131].

В труде [145] Ю. А. Хапилов и И. Г. Бородуля исследуют силовое взаимодействие сцепленных вагонов при прохождении горба горки. Установлено, что сверхнормативные нагрузки на автосцепки обусловлены защемлением, а их величина определяется дополнительным вертикальным смещением уровней осей автосцепок при следовании через горб горки. Произведена оценка вероятности сверхнормативного нагружения автосцепок у вагонов, проходящих перевальную часть при различ-

ных радиусах сопряжения надвижной и спускной частей горки. Многие положения данного исследования сохранили ценность и актуальность до сегодняшних дней.

В труде [118] В. И. Смирнова предлагается определять дополнительное вертикальное смещение осей автосцепок у вагонов, проходящих через горб горки, как функцию дуговых координат их баз. Также исследуются предельные проектные параметры профиля горба горки исходя из условия проходимости сцепленных вагонов. Предложенный метод может использоваться для анализа проектного продольного профиля перевальной части без разделительного элемента, но не учитывает осность вагонов и из-за высокой трудоемкости требует применения ЭВМ.

Большое количество работ М. Г. Дашкова [34, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 44, 45] развивает методику, предложенную ЦНИИ МПС [127], и приводит ее к виду, удобному для сравнения эксплуатационных показателей различных конструкций перевальной части сортировочных горок. В этих работах приведены уравнения траектории движения пятников вагонов в зависимости от их осности, величин радиусов вертикальных кривых, уклонов и длин элементов профиля горба горки. М. Г. Дашков значительно упрощает уравнения движения пятниковых точек вагона, пользуясь приближенным методом расчета их координат, при этом сохраняя точность расчетов на высоком уровне. Также была устранена погрешность в расчете при определении вертикальных координат пятниковых точек восьмиосных и четырехосных вагонов. В работах [36, 41, 44] обосновывается уменьшение нормативной величины допускаемого относительного вертикального смещения осей автосцепок для некоторых типов вагонов, рассматривается влияние искажений профиля перевальной части горки на возможное появление саморасцепа вагонов при ее проходе, предлагается методика расчета периодичности выправки продольного профиля горба горки в зависимости от пропущенного по нему тоннажа. Использование данного метода для горбов горок, имеющих наклонный профильный разделительный элемент, требует доработки уравнений траекторий движения пятниковых точек.

В работах [35, 43, 46] М. Г. Дашков исследует проходимость сцепов вагонов с длинномерными грузами вагонов через горб горки. Установлено, что расчет вы-

соты опорных устройств (подкладок или турникетных опор) при перевозке длиннономерного груза с опорой на смежные вагоны зависит от параметров продольного профиля сортировочной горки. Предложена корректировка расчетных формул, установленных техническими условиями погрузки и крепления грузов, для определения высоты опорных устройств в условиях измененных ТУПС-65 и ИПСУ-78 нормативов профиля горба горки. Однако корректировка произведена не была и до сих пор в нормативных документах (п. 12.5 [134]) высоту подкладок или турникетов рекомендуется определять по расчетным формулам, предложенным еще в 1960-е годы. Значения параметров этих формул были получены для универсальных платформ и полувагонов при следующих условиях: сумма величин сопрягаемых уклонов элементов профиля перевальной части горки 55 ‰; величина радиуса вертикальных кривых при сопряжении элементов профиля на горбе и спускной части горки 250 м.

В настоящее время в ряде исследований при проектировании новых сочлененных грузовых вагонов (например, сочлененных платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров моделей 13-470-01 и 13-9894) расчет турникетных опор, гарантирующих безопасность прохождения сортировочных горок, производится имитационным моделированием [67, 128]. Исследование влияния параметров турникетных опор на геометрическую проходимость сочлененными вагонами горбов сортировочных горок производится для трех видов продольного профиля: без профильного разделительного элемента, с профильным разделительным элементом [110], а также профиля в соответствии с документом «Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [84]. В каждом из вариантов профиля горбов горок выбираются граничные условия, обеспечивающие максимальные углы перелома профиля (55 или 70 ‰) и минимальные величины радиусов сопрягающих вертикальных кривых (250 м).

В новом ГОСТе 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [29] определение разницы высот осей автосцепок ΔS сцепленных вагонов производится путем математического моделирования их прохода через горб горки. По сравнению с методом ЦНИИ МПС [127] анализ ве-

личины ΔS допускает возможность производить расчеты для любого профиля произвольного очертания и разных вагонов, в том числе сочлененных. Обеспечение прохода проектируемого вагона проверяют для сортировочной горки с переломом профиля 55 ‰ между надвижной и спускной частями, сопряженными вертикальной кривой радиусом 250 м.

Таким образом, нормы расчета проходимости новых вагонов [27, 29], расчета высоты опорных устройств при перевозке длинномерных грузов на сцепках вагонов [134], а также на новых сочлененных вагонах-платформах [128], определены для проектного очертания профиля перевальной части горки с максимально допускаемым переломом профиля на горбе горке 55 ‰ и радиусом сопрягающих вертикальных кривых 250 м. При этом фактор возможного появления сверхнормативных искажений профиля, возникающих в процессе эксплуатации, учтен не в полной мере. Отсюда следует, что уменьшение фактического радиуса вертикальной сопрягающей кривой на вершине горки менее 250 м, при предельной сумме величин сопрягаемых уклонов элементов профиля на горбе горки, несет потенциальную угрозу безопасности прохождения вагонов и сцепов через горб горки. В связи с этим данный норматив пересмотру в сторону снижения не подлежит.

В настоящее время в СП 225.1326000.2014 «Станционные здания, сооружения и устройства» устанавливается в п. 5.20 следующее: «Продольный профиль сортировочных горок, радиусы вертикальных кривых проектируют с учетом обеспечения проходимости вагонов и предотвращения их самопроизвольного расцепления» [125].

Таким образом, существующие методы оценки проходимости сцепленных вагонов (отцепов) через горб горки не дают возможности количественно оценить вероятность появления саморасцепов вагонов или повреждения их автосцепных устройств. При этом большинство методов ориентировано только на нормативную конструкцию профиля горба горки. Также следует отметить недостаточное число научных работ, посвященных вопросам исследования проходимости подвижным составом перевальной части горок при искажении продольного профиля в процессе эксплуатации.

1.5 Анализ методов оценки фактического состояния продольного профиля перевальной части эксплуатируемых сортировочных горок

При анализе продольных профилей эксплуатируемых горок было установлено, что элементы горба горки, как правило, существенно деформируются в процессе эксплуатации. Это приводит к искажению проектного очертания горба горки, что может привести к «зубчатому» очертанию продольного профиля, а отклонения радиусов сопрягающих вертикальных кривых могут принять сверхнормативные значения. Данные искажения зачастую являются причинами саморасцепа вагонов на горбе горки, повреждения автосцепных устройств вагонов¹ (рисунок 1.1), а также затруднения отрыва или нерасцепов вагонов при расформировании. Это приводит к нарушению программы роспуска и выполнению дополнительной маневровой работы, а также может создавать потенциальную угрозу для безопасности процесса расформирования.

а)



б)



в)



Рисунок 1.1 – Последствия прохода отцепов через деформированный горб горки²:
а – фрагмент перевальной части сортировочной горки «Ч» с изломанными болтами;
б – излом маятникового болта; *в* – излом центрирующей балочки

¹ По этим же причинам, на некоторых сортировочных горках пропуск через горб горки отцепов из длинноразных вагонов некоторых моделей осуществляется с делением на одновагонные отцепы.

² Фотографии автора.

Нормами установлены допустимые искажения продольного профиля перевальной части горки [110]. Местное отклонение профиля пути в пределах сопряжения (перевальной части горки) от проектного профиля, измеренное визированием на участке длиной 10 и 15 м, допускается только в минусовую сторону (с увеличением радиуса сопряжения) и не должно быть более 10 мм, что является значительно более жесткими требованиями по сравнению с другими частями горки. Однако обеспечить содержание продольного профиля перевальной части в точном соответствии с приведенными нормативами затруднительно, что подтверждается существующей практикой эксплуатации сортировочных горок. Контроль соответствия профиля проекту должен производиться не реже одного раза в три года [59, 111].

Установлено, что периодичность выправки профиля горочных путей перевальной части не реже одного раза в три года соответствует условиям работы на горках малой мощности для конструкций верхнего строения пути Р50 1600 (II) Щ¹, на горках средней и большой мощности Р50 1840 (II) Щ [41]. Срок выправки определялся вероятностными расчетами, основанными на зависимости остаточных деформаций от пропущенного тоннажа и напряжений, возникающих в элементах пути при проходе колес подвижного состава. При этом допускаемая разность остаточных деформаций в различных сечениях перевальной части горки, обеспечивающая условия безопасного пропуска отцепов, принималась равной 36 мм. Впоследствии произошло усиление конструкции верхнего строения пути за счет перехода на более тяжелый тип рельсов Р65 и железобетонные шпалы. Также произошло и повышение осевых нагрузок подвижного состава. При этом в настоящее время местные отклонения профиля допускаются не более 10 мм, а периодичность выправки осталась прежней. Очевидно, что норматив периодичности выправки горба горки требует корректировки.

Для контроля фактического состояния профиля горба горки рекомендуется осуществлять нивелирную съемку с шагом на перевальной части 1–2 м с после-

¹ Шифр характеристики конструкции пути означает: тип рельса Р50, 1600 шпал на 1 км, деревянные шпалы II типа, щебеночный балласт.

дующей обработкой и анализом параметров на соответствие нормативным требованиям. Анализ параметров, как правило, проводится аналитическими методами. Однако в некоторых источниках [107] рекомендуется выполнять оценку параметров элементов профиля по критерию соответствия проекту на основе метода наименьших квадратов с использованием ЭВМ.

В Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств указывается: «При определении фактических отклонений и выправке элементов профиля с вертикальными кривыми, в том числе перевальной части горки, следует учитывать радиусы этих кривых» [110, с. 109]. Узость диапазона допустимых значений радиусов вертикальных кривых требует особого контроля параметров сопряжения на перевальной части в процессе эксплуатации. Существует достаточно много способов контроля параметров вертикальных кривых на горбе горки, которые можно сгруппировать по следующим позициям:

- аналитические методы, основанные на использовании приближенных формул, связанных с измерением стрел изгиба хорды [36, 60, 4];
- методы, основанные на точных аналитических выражениях [72];
- методы имитационного моделирования [93];
- методы неинструментального контроля (экспертный и т. п.);
- по нормам допусков на содержание продольных профилей горок [110, 151].

Анализ существующих аналитических методов контроля параметров сопряжения элементов продольного профиля на горбе сортировочных горок показал, что все они требуют достаточно подробных и точных данных съемки продольного профиля и имеют некоторые особенности использования [96].

Опыт эксплуатации сортировочных горок показал, что содержанию перевальной части горок уделяется недостаточно внимания. Фактическая периодичность проведения съемки продольного профиля перевальной части горки и контроля его параметров может превышать установленную нормами. При этом часто не проводится контроль параметров сопряжения горба горки. Ситуация усугубляется ошибками при определении значений радиусов сопрягающих вертикальных кривых вследствие недостаточной точности инструментальной съемки и состав-

ления технической документации, а также наличием на горочных путях местных искажений продольного профиля.

Выводы по первой главе

На основании выполненного анализа развития теории проектирования и опыта эксплуатации перевальной части сортировочных горок установлено следующее:

1. Перевальная часть как отдельный участок продольного профиля сортировочной горки выделилась в процессе совершенствования конструкции сортировочных устройств вследствие необходимости повышения производительности работы. Основное эксплуатационное назначение перевальной части горки заключается в обеспечении удобства расцепки вагонов за счет сжатия сцепных устройств у вершины горки, а также обеспечения плавного проследования подвижным составом горба горки.

2. Первоначально выбор параметров продольного профиля перевальной части горки основывался на оценке вертикальной вписываемости вагонов и практическом опыте эксплуатации. Впоследствии получила развитие теория определения параметров продольного профиля горба горки, основанная на учете особенностей автосцепных устройств вагонов.

3. Конструкция перевальной части сортировочных горок существенно влияет на эксплуатационные свойства всего сортировочного устройства. Основные эксплуатационные требования к продольному профилю перевальной части горки можно разделить на две группы:

- обеспечение безопасного прохождения подвижного состава через горб горки и предотвращение его самопроизвольного расцепления;
- обеспечение максимальной скорости роспуска и, как следствие, наибольшей перерабатывающей способности.

4. Действующие правила и нормы проектирования [110, 125] устанавливают диапазоны допустимых значений параметров продольного профиля перевальной

части горки, при этом отсутствуют рекомендации по определению оптимальных значений. Кроме того, в нормативах не в полной мере отражена специфика расчета параметров горбов сортировочных горок в части:

- учета дополнительного сопротивления в автосцепках, препятствующего своевременному разъединению вагонов на горбе горки;
- методики определения положения отцепов в момент их отрыва от состава при роспуске;
- оценки качества продольного профиля перевальной части горок (в том числе, отсутствие методик определения вероятностей саморасцепов, повреждения вагонов и нерасцепов, и оценки их влияния на эксплуатационные характеристики сортировочного устройства в целом).

5. Выполненный анализ нормативов, научных работ и методов расчета параметров перевальной части горки показал, что целесообразно проведение дополнительных исследований по следующим направлениям:

- исследование процесса отрыва отцепов от состава на горбе горки при роспуске для уточнения положения отцепов в момент их отрыва от состава;
- моделирование и определение показателей процесса прохождения сцепленных вагонов через перевальную часть горки при роспуске для выбора наиболее рационального варианта продольного профиля;
- анализ продольного профиля перевальной части горки и влияние его на сортировочный процесс и перерабатывающую способность горки.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРЫВА ОТЦЕПОВ ОТ СОСТАВА НА ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРКИ ПРИ РОСПУСКЕ

2.1 Разработка аналитического метода определения положения одновагонных отцепов в момент отрыва от состава при роспуске с горки

2.1.1 Определение условия отрыва одновагонных отцепов от состава при роспуске

В настоящее время при проектировании и оптимизации конструкции горок для определения положения отцепов в момент их отрыва от состава на горбе применяются аналитические методы, в которых, как правило, за начало свободного скатывания одновагонного отцепа принимается момент, когда тангенс наклона продольной оси вагона к горизонтальной плоскости, эквивалентный удельной профильной ускоряющей силе, численно превысит суммарное удельное сопротивление движению $\sum w$ [42, 53, 55, 152]. Такое условие отрыва вагона является несколько упрощенным, что приводит к появлению погрешностей при вычислениях.

Применение метода имитационного моделирования процесса роспуска составов, основанного на шарнирно-осевом представлении отцепов, позволяет получать более точные результаты [1, 12; 63, 76]. Согласно данной модели отрыв вагона от состава происходит в момент, когда средневзвешенный уклон под осями вагона превысит значение величины суммарного удельного сопротивления движению. Учитывая, что влияние на расчетное значение средневзвешенного уклона длины базы тележки вагона незначительное, для упрощения дальнейших расчетов в данной работе рассматриваются только уклоны пути под пятниками вагона. При этом условие отрыва одновагонного отцепа от состава, согласно шарнирно-осевой модели вагона, имеет вид [88]:

$$-(i_1 + i_2)/2 > \sum w, \quad (2.1)$$

где i_1, i_2 – уклоны продольного профиля пути на горбе горки под пятниками вагона со стороны надвижной и спускной частей соответственно (знак минус принимается при ускоряющем воздействии уклона на отцеп), ‰;

$\sum w$ – суммарное удельное сопротивление движению отцепа в момент отрыва от состава, Н/кН.

Выражение (2.1) не учитывает наклон продольной оси вагона к горизонтальной плоскости при прохождении перевальной части горки. Поэтому, в работах автора [92, 95] произведен вывод условия отрыва одновагонного отцепа с использованием уравнения равновесия плоской системы сил, действующих на пятники вагона. Получено следующее итоговое выражение, учитывающее наклон продольной оси вагона к горизонтальной плоскости:

$$\frac{\sin \alpha_2 \cdot \cos(\alpha_1 + \beta) - \sin \alpha_1 \cdot \cos(\alpha_2 - \beta)}{\cos \alpha_1 \cdot \cos(\alpha_2 - \beta) + \cos \alpha_2 \cdot \cos(\alpha_1 + \beta)} > \sum w \cdot 10^{-3}, \quad (2.2)$$

где α_1 и α_2 – углы наклона касательных к линии продольного профиля перевальной части горки под задним и передним пятниками вагона соответственно;

β – угол наклона продольной оси вагона к горизонтальной оси.

Углы наклона продольной оси вагона на перевальной части сортировочной горки незначительные (не более 3 град.). Поэтому в данной работе принимается, что угол наклона продольной оси вагона к горизонтальной плоскости в момент отрыва отцепа равен нулю ($\beta = 0$), а выражение (2.2) принимает вид:

$$\frac{\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 + \cos \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1} > \sum w \cdot 10^{-3}. \quad (2.3)$$

При дальнейшем преобразовании условие (2.3) примет вид:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1}{2} > \sum w \cdot 10^{-3}. \quad (2.4)$$

В свою очередь, упрощенное условие (2.4) можно преобразовать к виду, аналогичному выражению (2.1):

$$\frac{-(i_1 + i_2)}{2} > \sum w, \quad (2.5)$$

где i_1, i_2 – значения уклонов продольного профиля пути на горбе горки под пятниками вагона со стороны надвигной и спускной частей соответственно (знак минус принимается при ускоряющем воздействии уклона на отцеп), ‰.

Очевидно, что упрощенное условие отрыва одновагонного отцепа от состава (2.5), полученное с использованием уравнения равновесия плоской системы

сил, совпадает с условием отрыва (2.1), полученным на основании шарнирно-осевой модели, используемой при имитационном моделировании. Выражения (2.2) и (2.5) различаются левой частью, где производится определение удельной движущей силы. Сравнение результатов расчета удельной движущей силы, полученных с использованием выражения (2.2) и упрощенного выражения (2.5) или (2.1), показало, что относительная разность результатов не превышает 0,2 % (таблица 2.1). Следовательно, для практического применения при аналитических расчетах можно использовать выражение (2.5).

Таблица 2.1 – Сравнение результатов расчета удельной движущей силы, действующей на одновагонный отцеп

Уклон продольного профиля пути под пятником вагона*, ‰		Угол наклона продольной оси вагона к горизонту, ‰	Удельная движущая (профильная) сила, Н/кН		Относительная разность результатов, %
			определенная с использованием выражения (2.2)	определенная с использованием упрощенного выражения (2.5)	
задним	передним				
16	-20	10	2,00324	2,0	0,162
8	-10	5	1,000405	1,0	0,04
8	-20	0	6,0	6,0	0,0
20	-30	-10	4,99375	5,0	-0,125
5	-25	-10	9,99775	10,0	-0,023
0	-25	-15	12,49766	12,5	-0,019
0	-50	-25	24,98438	25,0	-0,062
-20	-50	-35	34,99213	35,0	-0,022
-50	-50	-50	50,0	50,0	0,0

* – знак минус принимается при ускоряющем воздействии уклона на отцеп.

2.1.2 Разработка аналитического метода расчета положения одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава

При разработке аналитического метода в качестве условия отрыва одновагонного отцепа на горбе горки принималось выражение (2.5), обеспечивающее

точность расчетов, сопоставимую с методом имитационного моделирования при использовании шарнирно-осевой модели отцепа [88, 95].

Решение неравенства (2.5) целесообразно производить, используя уравнения траектории движения пятников вагона по горбу горки, приведенные в таблице 2.2. Для этого продольный профиль перевальной части сортировочной горки, представленный на рисунке 2.1, разбивается на четыре участка, для которых составляются уравнения траектории движения заднего и переднего пятников. При этом тангенс угла наклона касательной к участку продольного профиля горба горки, численно равный уклону под пятником вагона, будет определяться через первую производную уравнения его траектории движения.

Таблица 2.2 – Аналитические зависимости для описания прохождения одновагонного отцепа по участкам перевальной части сортировочной горки

Уравнения траектории движения пятников вагона на участках продольного профиля горба горки, $y = f(x)$		Уравнения тангенса угла наклона касательной под пятниками вагона на участках продольного профиля горба горки, $\operatorname{tg} \alpha = y' = f'(x)$	
заднего	переднего	задним	передним
I – участок противоуклона			
$y_1 = i_n(x-l-T_n) \cdot 10^{-3}$, при $x-l \leq -2T_n$	– *	$\operatorname{tg} \alpha_1 = i_n \cdot 10^{-3}$, при $x-l \leq -2T_n$	– *
II – участок вертикальной кривой со стороны надвижной части			
$y_1 = -\frac{(x-l)^2}{2R_n}$, при $-2T_n < x-l < 0$	– *	$\operatorname{tg} \alpha_1 = -\frac{x-l}{R_n}$, при $-2T_n < x-l < 0$	– *
III – участок вертикальной кривой со стороны спускной части			
$y_1 = -\frac{(x-l)^2}{2R_c}$, при $0 \leq x-l < 2T_c$	$y_2 = -\frac{(l+x)^2}{2R_c}$, при $0 < x+l < 2T_c$	$\operatorname{tg} \alpha_1 = -\frac{x-l}{R_c}$, при $0 \leq x-l < 2T_c$	$\operatorname{tg} \alpha_2 = -\frac{x+l}{R_c}$, при $0 < x+l < 2T_c$
IV – участок скоростного элемента			
– *	$y_2 = -i_c \cdot (l+x-T_c) \cdot 10^{-3}$, при $x+l \geq 2T_c$	– *	$\operatorname{tg} \alpha_2 = -i_c \cdot 10^{-3}$, при $x+l \geq 2T_c$
Примечания: x – координата центра отцепа относительно вершины горки, м; l – половина базы вагона, м; i_n – крутизна противоуклона, ‰; i_c – уклон скоростного элемента, ‰; R_n , R_c – радиусы вертикальных кривых со стороны надвижной и спускной части соответственно, м; T_n , T_c – значения тангенсов вертикальных кривых со стороны надвижной и спускной части соответственно, м; * – вариант не рассматривается, так как при расположении пятника на данном участке отрыв отцепа от состава невозможен.			



Рисунок 2.1 – Схема к определению уклонов под пятниками вагона на участках продольного профиля горба горки

В процессе прохождения перевальной части горки возможны пять основных вариантов расположения пятников вагона на расчетных участках в момент отрыва от состава, представленных на рисунке 2.2. Наличие нескольких вариантов обусловлено многообразием возможных конструктивных параметров горок, широкой номенклатурой моделей вагонного парка, а также разбросом значений суммарного удельного сопротивления движению отцепов. На рисунках 2.1 и 2.2 выделены зоны горки: I зона – противоуклон; II зона – вертикальная кривая со стороны надвигной части; III зона – вертикальная кривая со стороны спускной части; IV зона – скоростной элемент.

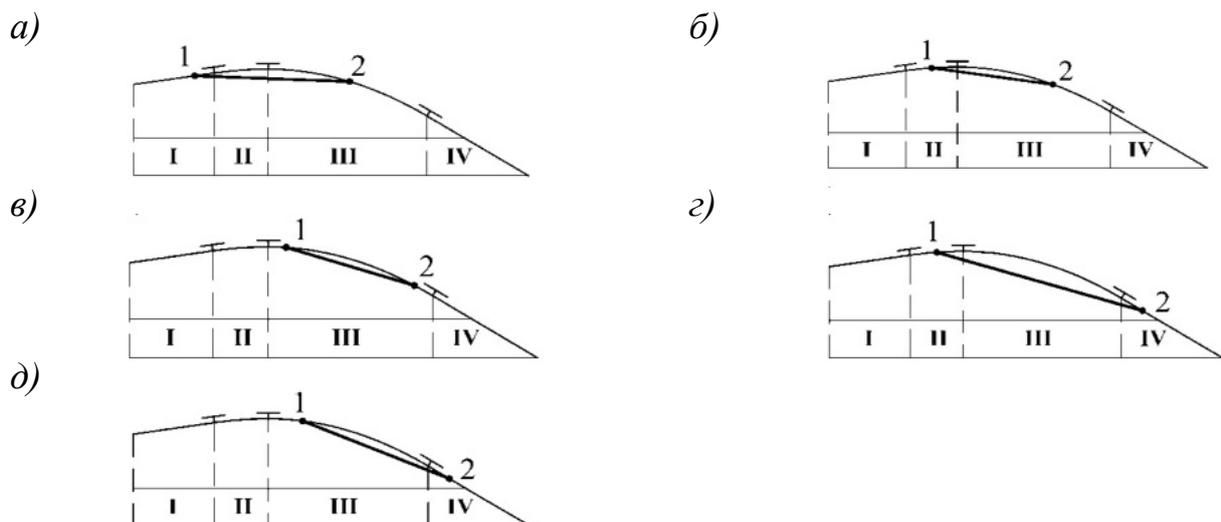


Рисунок 2.2 – Возможные варианты расположения пятников вагона на горбе горки в момент отрыва одновагонного отцепа от состава:

а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; г – вариант 4; д – вариант 5

Очевидно, что для большинства горок и конструкций вагонов в момент отрыва отцепы от состава наиболее вероятным месторасположением заднего пятника вагона будет противоуклон, а переднего пятника – вертикальная кривая со стороны спускной части или скоростной элемент, как изображено на рисунке 2.2, а. Поэтому в первую очередь выполняется расчет координаты точки отрыва x_0 при указанном расположении пятников. Для этого производится подстановка в выражение (2.5) уравнений уклонов из таблицы 2.2, соответствующих траекториям движения пятников вагона в обозначенных зонах горба горки. В результате решения выражения (2.5) координата центра вагона относительно вершины горки в момент его отрыва от состава будет определяться по формуле:

$$x_0 = R_c(2\sum w + i_n) \cdot 10^{-3} - l, \text{ если } \begin{cases} x_0 \leq l - 2T_n, \\ -l \leq x_0 \leq 2T_c - l. \end{cases} \quad (2.6)$$

Если значение x_0 не удовлетворяет условиям выражения (2.6), то расположение пятников не будет соответствовать расчетной схеме варианта 1 (рисунок 2.2, а). Поэтому необходимо произвести дополнительный расчет для варианта 2 (рисунок 2.2, б) по формуле:

$$x_0 = \frac{2\sum w \cdot 10^{-3} \cdot R_c R_n - l(R_n - R_c)}{R_n + R_c}, \text{ если } \begin{cases} l - 2T_n \leq x_0 \leq l, \\ -l \leq x_0 \leq 2T_c - l. \end{cases} \quad (2.7)$$

Такое положение наиболее характерно для короткобазных вагонов, крутых противоуклонов или больших значениях суммарного удельного сопротивления движению отцепы в момент отрыва.

Если значение x_0 не удовлетворяет и условиям выражения (2.7), то необходимо произвести дальнейший расчет для варианта 3 (рисунок 2.2, в). В этом случае задний и передний пятники располагаются на вертикальной кривой со стороны спускной части. Такое положение возможно при затруднении отрыва вагонов и при высоких значениях суммарного удельного сопротивления движению отцепы в момент его отрыва. Для варианта 3 координата отрыва определяется по формуле:

$$x_0 = R_c \sum w \cdot 10^{-3}, \text{ если } \begin{cases} l \leq x_0 \leq 2T_c + l, \\ -l \leq x_0 \leq 2T_c - l. \end{cases} \quad (2.8)$$

Если значение x_0 также не будет удовлетворять условиям выражения (2.8), то необходимо произвести дальнейший расчет для варианта 4 (рисунок 2.2, *з*). Такое положение маловероятно и возможно при затруднении отрыва длиннобазных вагонов, а также небольшом уклоне скоростного элемента или значительном суммарном удельном сопротивлении движению в момент отрыва. Для варианта 4 координата центра вагона в момент отрыва будет определяться по формуле:

$$x_0 = R_n(2\sum w - i_c) \cdot 10^{-3} + l, \text{ если } \begin{cases} x_0 \geq 2T_c - l, \\ l - 2T_n \leq x_0 \leq l. \end{cases} \quad (2.9)$$

Если значение x_0 и в этом случае не будет удовлетворять условиям выражения (2.9), то расположение пятников будет соответствовать варианту 5 (рисунок 2.2, *д*). Такое положение наименее вероятно и возможно только при значительном суммарном удельном сопротивлении движению отцепа в момент его отрыва от состава, вызванном сильным встречным ветром или (и) высоким сопротивлением разъединению взаимодействующих автосцепок. В этом случае расчет координаты производится по формуле:

$$x_0 = R_c(2\sum w - i_c) \cdot 10^{-3} + l, \text{ если } \begin{cases} x_0 \geq 2T_c - l, \\ l \leq x_0 < 2T_c + l. \end{cases} \quad (2.10)$$

Если значение x_0 , полученное по формулам (2.6)–(2.10), не удовлетворяет условиям применения этих выражений, то отрыв отцепа от состава невозможен в силу чрезвычайно большого значения суммарного удельного сопротивления движению.

Для решения рассматриваемой задачи разработан алгоритм расчета, представленный на рисунке 2.3. Следует отметить, что для определения координаты точки отрыва, как правило, достаточно произвести расчет, используя только формулу (2.6), и лишь при некоторых условиях может потребоваться продолжить вычисления по формуле (2.7). Необходимость дальнейшего расчета по формулам (2.8), (2.9) и (2.10) может возникнуть только при высоких значениях суммарного удельного сопротивления движению отцепа, что маловероятно.

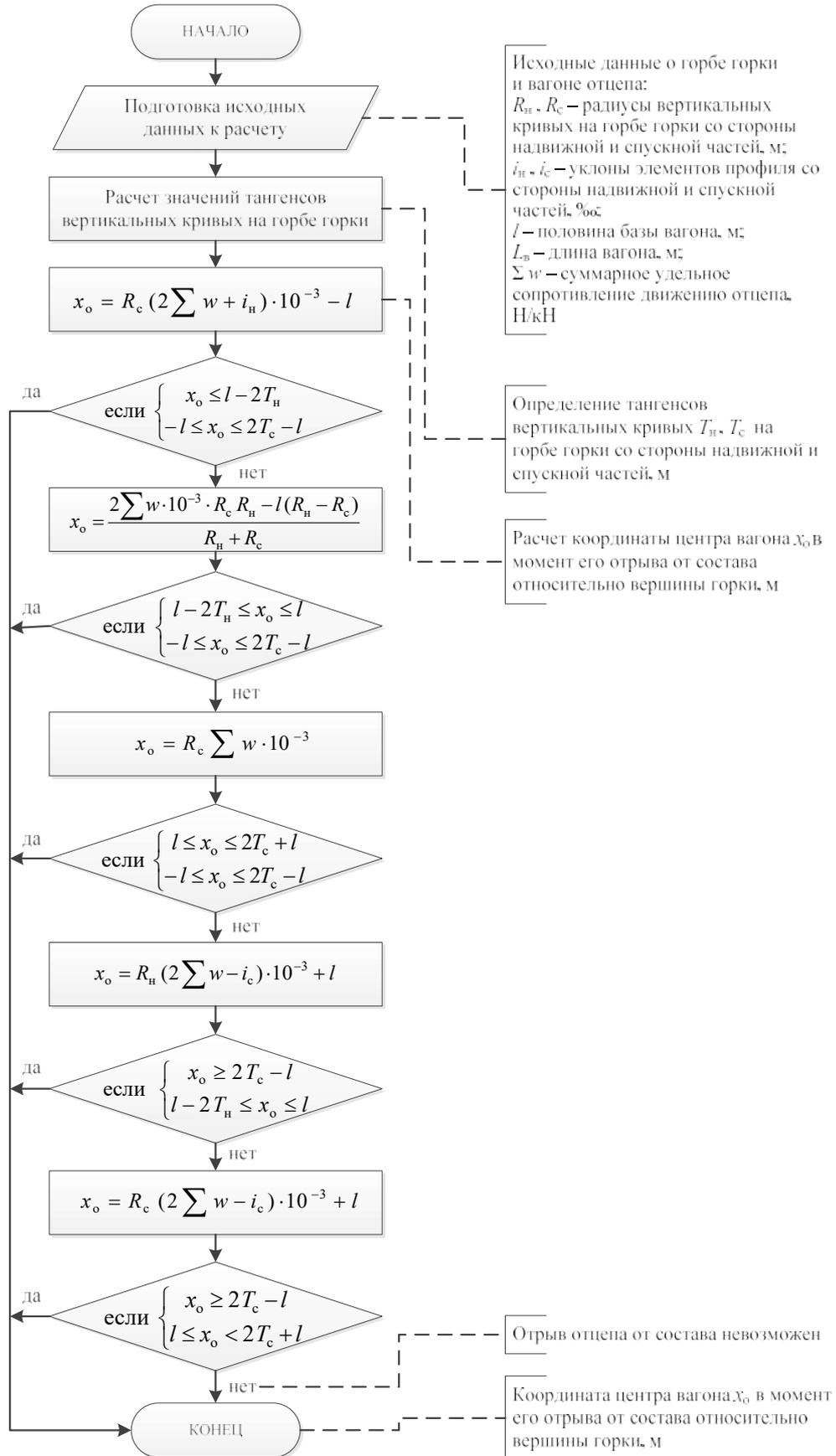


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритма расчета координаты положения отцепа в момент отрыва от состава аналитическим методом

2.1.3 Сравнение результатов расчета координат точек отрыва отцепов, определенных различными методами расчета

Произведено сравнение координат точек отрыва отцепов, рассчитанных с использованием разработанного аналитического метода, с результатами, полученными при использовании других аналитических методов. Сравнение производилось для различных моделей вагонов, конструкций горбов горок, а также при различных значениях суммарного удельного сопротивления движению в момент отрыва (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Сравнение результатов расчета координат одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава, полученных различными методами

Параметры продольного профиля перевальной части горки	Суммарное удельное сопротивление движению отцепа Σw , Н/кН	Координата центра вагона (крытый вагон длиной 14,73 м / полувагон длиной 13,92 м) относительно вершины горки в момент отрыва от состава, м				
		Аналитические методы				Метод имитационного моделирования (шаг 0,01 м)
		предлагаемый метод	метод [16]	метод [53, 116]	метод [55]	
$i_n = 5 \text{ ‰}$; $i_c = 50 \text{ ‰}$; $R_n = 350 \text{ м}$; $R_c = 250 \text{ м}$	0,5	-3,50 / -2,83	0,13 / 0,13	-0,66 / -0,40	-0,90 / -0,58	-3,51 / -2,84
	4,5	-1,50 / -0,83	1,13 / 1,13	0,85 / 0,98	0,72 / 0,92	-1,51 / -0,84
	10	1,25 / 1,92	2,5 / 2,5	2,45 / 2,48	2,47 / 2,55	1,22 / 1,85
	15	3,54 / 3,65	3,75 / 3,75	3,75 / *	3,81 / *	3,37 / 3,62
	25	6,25 / 6,25	6,25 / 6,25	*	*	6,245 / 6,246
	35	10,0 / 9,33	8,75 / 8,75	*	*	10,0 / 9,33
	45	15,0 / 14,33	11,25 / 11,25	*	*	15,01 / 14,34
$i_n = 20 \text{ ‰}$; $i_c = 35 \text{ ‰}$; $R_n = 400 \text{ м}$; $R_c = 300 \text{ м}$	0,5	-0,54 / -0,45	0,15 / 0,15	-0,12 / -0,07	*	-0,544 / -0,449
	4,5	0,83 / 0,93	1,35 / 1,35	1,23 / 1,27	*	0,82 / 0,92
	10	2,71 / 2,81	3,0 / 3,0	2,98 / 3,0	*	2,71 / 2,81
	15	4,43 / 4,5	4,5 / 4,5	*	*	4,40 / 4,45
	25	9,50 / 8,83	7,5 / 7,5	*	*	9,50 / 8,83
* – применение расчетной формулы недопустимо из-за выхода входных данных за область допустимых значений.						

Установлено, что из-за упрощенного представления модели вагона при проведении расчетов аналитическими методами [16, 53, 55, 116], рассматриваемыми в главе 1, положение одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава может быть удалено в сторону спускной части горки на несколько метров, что может вызывать погрешности в горочных расчетах.

Сравнение результатов, полученных с использованием разработанного аналитического метода, с результатами, полученными методом имитационного моделирования скатывания вагонов с горки с использованием шарнирно-осевой модели [63, 77], показало, что отклонение в положениях координат точек отрыва одновагонных отцепов, полученное двумя этими методами, не превышает 0,01–0,2 м, что свидетельствует о достаточно высокой точности расчетов по предлагаемому методу.

Новый аналитический метод наглядно устанавливает соотношения между влияющими факторами и обеспечивает высокую точность расчетов при существенно меньшей по сравнению с имитационным моделированием трудоемкости. Кроме этого, в сравнении с другими аналитическими методами [16, 53, 55, 116] предлагаемый метод не имеет ограничений на диапазон возможных входных значений параметров горба горки и величин удельного сопротивления движению.

В разработанном методе рассматриваются одновагонные отцепы, так как именно отцепы из одиночных вагонов приняты для выполнения горочных расчетов, в том числе для определения предельно допустимых уровней технических и технологических параметров горок. Поэтому положение точек отрыва одновагонных отцепов во многом и определяет результаты роспуска каждого состава. Разработка аналитических методов определения положения точек отрыва отцепов из нескольких вагонов является отдельной задачей, выходящей за рамки настоящего исследования. При этом разработанные в данном параграфе подходы и методы могут быть использованы в дальнейшем для решения аналогичных задач при исследовании отрыва отцепов из нескольких вагонов.

2.2 Определение положения отцепов в момент отрыва от состава при роспуске с использованием имитационного моделирования

2.2.1 Разработка имитационной модели для определения положения отцепов в момент их отрыва от состава

Использование рассмотренных выше аналитических методов расчета положения одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава при роспуске имеет несколько ограничений, например:

- применение возможно только при исследовании проектного продольного профиля, не имеющего местных искажений;
- использование расчетных формул возможно только при типовых конструкциях продольного профиля перевальной части горки, что не позволяет рассматривать продольный профиль произвольного очертания;
- рассматривается упрощенная модель вагона;
- невозможность применения для многовагонных отцепов.

Использование метода имитационного моделирования позволяет исключить указанные недостатки и наиболее подходит для решения задач оптимизации конструкции эксплуатируемых горок.

Кроме этого, как уже указывалось выше (см. п. 1.3), до настоящего времени вопрос исследования явления несвоевременного отделения отцепов от состава остается не в полной мере проработанным. Поэтому представляется целесообразным произвести исследование влияния возможных сил сопротивления в контуре зацепления автосцепок на задержку отрыва отцепов от состава.

Для решения этой задачи необходимо производить расчет положения отцепов на перевальной части горки в момент их отрыва от состава с учетом возможности возникновения сил сопротивления в расцепленных автосцепках. При этом для проведения дальнейших исследований необходимо производить как прямой расчет (т. е. расчет положения отцепа в момент его отрыва от состава в зависимости от величины действующих сил сопротивления в автосцепках), так и обратный расчет (т. е. расчет величин действующих сил сопротивления в автосцепках смежных отцепов при роспуске в зависимости от положения отцепа в момент его отрыва от состава). Кроме этого, должна быть возможность производить расчеты на произвольном очертании продольного профиля перевальной части горки, для возможного проведения исследования сил сопротивления в автосцепках на эксплуатируемых горках.

Учитывая высокую сложность решения задачи известными аналитическими методами, представляется целесообразным разработать математическую модель для расчета положения отцепов в момент их отрыва от состава, учитывающей си-

лы взаимодействия в расцепленных автосцепках, решение которой будет производиться с использованием ЭВМ.

Разрабатываемая модель основывается на шарнирно-осевом представлении отцепа. В отличие от существующих имитационных моделей в данной модели предлагается в дополнение к суммарному сопротивлению движению отцепа учитывать новое дополнительное слагаемое – *сопротивление разъединению автосцепок* смежных отцепов при их отделении от состава. Также имитационная модель позволяет учитывать степень влияния возможных сил *сопротивления разъединению автосцепок* на задержку отделения отцепа от состава при произвольном очертании продольного профиля горки и любых заданных параметрах вагона.

При проведении различных исследований и расчетов положение точки отрыва от состава одиночного вагона или отцепа из нескольких вагонов может определяться расстоянием от вершины горки до их центра тяжести, либо до первых или последних колесных пар отцепа, либо до осей зацепления автосцепок впередиидущих вагонов (головы отцепа) или последних вагонов (хвоста отцепа) в момент, когда начинается их свободное скатывание. В рассматриваемой модели за координату точки отрыва x_0 принимается расстояние от фактической вершины горки до центра тяжести последнего вагона в отцепе (хвоста отцепа) в момент его отрыва от состава (рисунок 2.4).

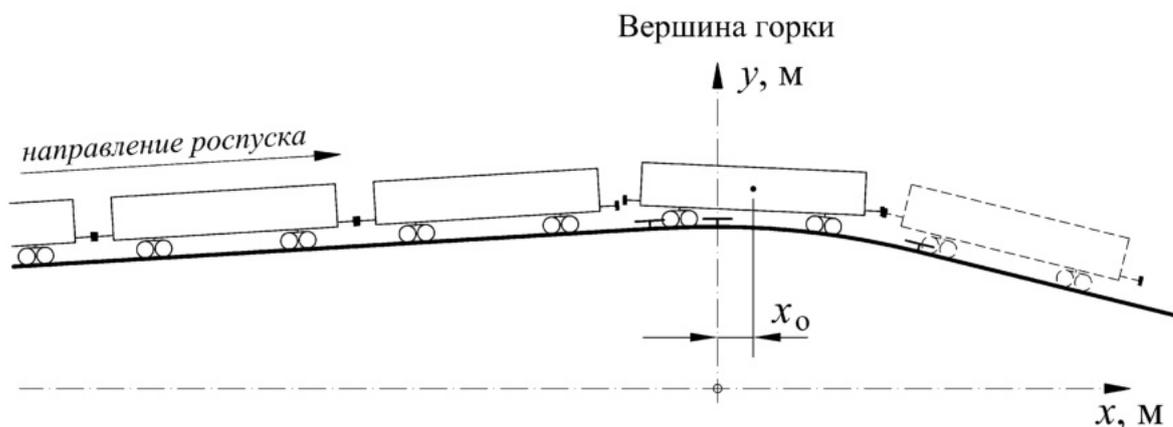


Рисунок 2.4 – Расчетная схема для определения координаты x_0 точки отрыва отцепа¹ от состава

¹ Сплошной линией показан отрывающийся отцеп из одного вагона, а штриховой – часть отцепа из нескольких вагонов.

Имитационное моделирование отрыва отцепов от состава производится в несколько этапов.

На первом подготовительном этапе производится формирование массива данных координат $[x_i, y_i]$, описывающих продольный профиль перевальной части горки. Массив координат $[x_i, y_i]$ может формироваться по задаваемым геометрическим параметрам горба горки, таким, как длины прямолинейных элементов профиля и величины их уклонов, а также радиусы сопрягающих вертикальных кривых. При этом горизонтальный шаг Δx при формировании массива координат $[x_i, y_i]$ может задаваться произвольно в зависимости от требуемой точности расчетов. При исследовании эксплуатируемых горок, массив данных о продольном профиле формируется путем ввода последовательности координат x_i и y_i , полученных в результате инструментальной съемки перевальной части горочного пути. В обоих случаях координата вершины горки $x_{вг}$ принимается равной нулю, а координата $y_{вг}$ принимается:

- в первом случае, равной любой условной высотной отметке;
- во втором случае, равной фактической высотной отметке по результатам инструментальной съемки.

На втором подготовительном этапе производится формирование данных о скатываемом отцепе: число вагонов в отцепе, тип каждого вагона в отцепе, геометрические параметры вагона (длина вагона, база вагона, расстояние между осями колесных пар у тележки, число осей и т. п.), удельные сопротивления движению отцепа (основное, от среды и ветра, от стрелок и кривых).

На третьем этапе моделируется движение отцепа по перевальной части горки путем последовательного его смещения в сторону спускной части с выбранным шагом Δx от начальной позиции до момента равенства сил сопротивления движению отцепа и движущих (профильных) сил.

За начальное положение отцепа принимается такая его позиция, при которой расцепляемые автосцепки находятся в сжатом состоянии, обеспечивающем возможность проведения расцепления горочным составителем. Как правило¹, расцепка производится при расположении отцепа перед вершиной горки. Поэтому

¹ В некоторых случаях, например, при роспуске длинных многовагонных отцепов или появлении затруднений со своевременным выполнением расцепления, расцепка автосцепок может производиться и при расположении части или всего отцепа на спускной части. При этом горочному локомотиву необходимо выполнить кратковременный толчок, обеспечивающий сжатие автосцепок, для появления возможности их расцепки составителем, так как растянутые автосцепки расцепить крайне затруднительно.

в имитационной модели расчетная начальная позиция устанавливается при таком положении отцепа, при котором первая ось колесной пары головного вагона отцепа достигает фактической вершины горки.

Окончанием третьего этапа при последовательном перемещении отцепа, состоящего из одного вагона, будет являться момент, когда его положение будет соответствовать такой позиции на горбе горки (рисунок 2.5), при которой нарастающая величина движущей (профильной) силы $F^{пр}$, действующей на вагон, сравняется с величиной силы суммарного сопротивления движению вагона $W^{сумм}$.

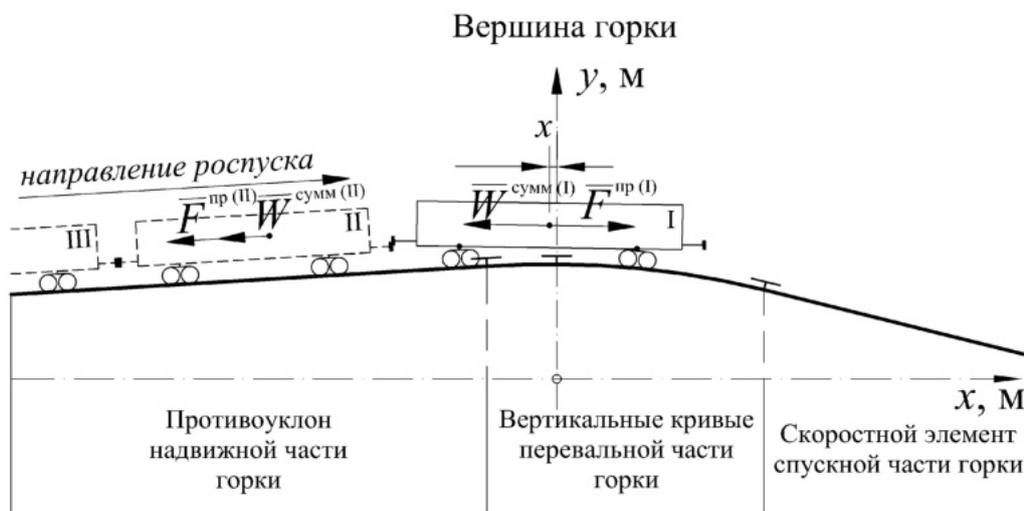


Рисунок 2.5 – Положение одновагонного отцепа на горбе горки в момент равенства движущей силы и суммарной силы сопротивления движению, соответствующее окончанию третьего этапа

Для многовагонного отцепа величина движущей силы определяется как сумма профильных сил всех вагонов, входящих в данный отцеп. При этом момент перехода к следующему этапу моделирования, определяемый равенством значений величин движущей силы и суммарных сил сопротивления движению всего отцепа, можно представить следующим выражением:

$$\sum_{k=1}^{n_b} F_k^{пр} = \sum_{k=1}^{n_b} W_k^{сумм}, \quad (2.11)$$

где n_b – количество вагонов в отцепе, ваг/отцеп;

$F_k^{пр}$ – проекция на горизонтальную ось движущей (профильной) силы, действующей на k -ый вагон в отцепе, Н;

$W_k^{\text{сумм}}$ – проекция на горизонтальную ось суммарной силы сопротивления движению k -го вагона в отцепе в момент окончания третьего этапа моделирования, складывающаяся из величин силы основного сопротивления движению, силы сопротивления движению от воздушной среды и ветра, силы сопротивления от стрелочных переводов и кривых, Н.

Проведенные натурные наблюдения на сортировочных горках и последующий их анализ [101] показали, что реальные процессы, описываемые на этом этапе моделирования, могут быть достаточно достоверно формализованы с использованием широко применяемой шарнирно-осевой модели скатывающихся отцепов [1, 12, 63, 75, 77]. В указанной модели при определении профильных сил принята система шарнирно-соединенных материальных точек, расстояния между которыми равны расстояниям между соответствующими осями отцепа, а масса, сосредоточенная в каждой точке, равна нагрузке на соответствующую ось отцепа (рисунок 2.6). С учетом вышесказанного, выражение (2.11) примет вид:

$$\sum_{k=1}^{n_n} \sum_{j=1}^{n_k^o} (F_{kj}^{\text{пр}} \cos \alpha_{kj}) = \sum_{k=1}^{n_n} W_k^{\text{сумм}}, \quad (2.12)$$

где n_k^o – количество осей у k -го вагона в отцепе, осей/вагон;

F_{kj} – профильная сила, действующая на j -ую ось k -го вагона в отцепе, Н;

α_{kj} – угол наклона касательной к линии продольного профиля горба горки относительно горизонтальной плоскости в месте касания рельса j -й осью k -го вагона в отцепе, град.

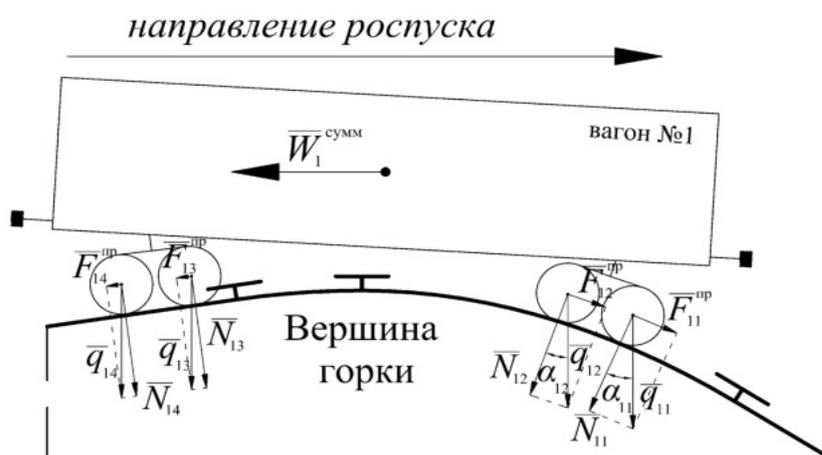


Рисунок 2.6 – Расчетная схема для определения движущих профильных сил, действующих на оси k -го вагона в отцепе

При переходе с абсолютных величин сил на удельные и использовании вышеуказанной модели скатывающихся отцепов, а также учитывая возможность различного воздействия сил сопротивления движению отцепа на каждую его ось¹, выражение (2.12) принимает следующий вид:

$$\sum_{k=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_k^o} (f_{kj} q_{kj} \cos \alpha_{kj}) = \sum_{k=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_o} (w_{kj} q_{kj} \cos \alpha_{kj}), \quad (2.13)$$

где f_{kj} – удельная движущая (профильная) сила, действующая на j -ю ось k -го вагона в отцепе, Н/кН;

q_{kj} – сила тяжести (вес), действующая на j -ю ось k -го вагона в отцепе, кН;

w_{kj} – суммарное удельное сопротивление движению, действующее на j -ю ось k -го вагона в отцепе, складывающееся из величин основного удельного сопротивления движению, удельного сопротивления движению от воздушной среды и ветра, удельного сопротивления от стрелочных переводов и кривых, а также удельного сопротивления от воздействия вагонных замедлителей, Н/кН.

Преобразуя формулу (2.13), согласно расчетной схеме, приведенной на рисунке 2.6, относительно f_{kj} получим:

$$\sum_{k=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_k^o} \left(\frac{q_{kj} \cdot 10^3 \cdot \sin \alpha_{kj}}{q_{kj}} q_{kj} \cos \alpha_{kj} \right) = \sum_{k=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_o} (w_{kj} q_{kj} \cos \alpha_{kj}). \quad (2.14)$$

Ввиду небольшой величины углов наклона продольного профиля к горизонту α_{kj} и учитывая, что косинус малых углов приближенно равен единице², а синус малых углов приближенно равен тангенсу, то целесообразно выражение (2.14) преобразовать в следующий вид:

$$\sum_{k=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_k^o} (10^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{kj} q_{kj}) = \sum_{k=1}^{n_b} \sum_{j=1}^{n_o} (w_{kj} q_{kj}). \quad (2.15)$$

¹ Различное воздействие сил сопротивления движению вагона на его оси может возникать, например, в случае проследования отцепом круговых кривых и стрелочных переводов, а также вагонных замедлителей, находящихся в заторможенном состоянии.

² При максимально допускаемой крутизне первого скоростного уклона, равной 50‰ (2,86°), погрешность определения каждой из сил на нем составит не более 0,125%, так как $\cos(2,86^\circ) \approx 0,9987544$. При этом следует учитывать, что фактическая суммарная погрешность будет значительно меньше из-за того, что погрешности определения движущей профильной силы и силы сопротивлению движению взаимно компенсируют друг друга.

Принимая во внимание, что у порожних, а также и у большинства¹ груженых вагонов значения сил тяжести, действующих на все оси вагона, приближенно равны между собой, а также равенство величин тангенса угла наклона и крутизны уклона, формулу (2.15) можно преобразовать до следующего выражения:

$$\sum_{k=1}^{n_b} \left(\frac{Q_k}{n_k^o} \cdot \sum_{j=1}^{n_k^o} (i_{kj}) \right) = \sum_{k=1}^{n_b} \left(\frac{Q_k}{n_k^o} \cdot \sum_{j=1}^{n_k^o} (w_{kj}) \right), \quad (2.16)$$

$$\text{или} \sum_{k=1}^{n_b} \left(\frac{m_k g'_k}{n_k^o} \cdot \sum_{j=1}^{n_k^o} (i_{kj}) \right) = \sum_{k=1}^{n_b} \left(\frac{m_k g'_k}{n_k^o} \cdot \sum_{j=1}^{n_k^o} (w_{kj}) \right), \quad (2.17)$$

где Q_k – расчетный вес k -го вагона в отцепе, кН;

m_k – масса k -го вагона, входящего в отцеп, т;

g'_k – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся частей (колесных пар) отцепа, м/с²;

i_{kj} – значение уклона касательной к линии продольного профиля горба горки в месте касания рельса j -й оси k -го вагона в отцепе, ‰;

n_k^o – число осей у k -го вагона в отцепе.

Для отцепа, состоящего из одного четырехосного вагона, условие (2.11) и выражение (2.27) можно упростить до вида:

$$-(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) = \sum w, \quad (2.18)$$

где i_1, i_2, i_3, i_4 – значения крутизны уклонов продольного профиля пути на горбе горки под осями вагона (знак минус принимается при ускоряющем воздействии уклона на отцеп), ‰.

Окончанием третьего этапа моделирования при последовательном перемещении отцепа в сторону спускной части горки будет являться момент, когда его положение будет соответствовать равенству (2.17) для многовагонного отцепа или равенству (2.18) для одновагонного отцепа. Данное положение на горбе горки характеризуется моментом равенства нарастающей движущей (профильной) силы $F^{пр}$, действующей на отцеп, и силы суммарного сопротивления движению $W^{сумм}$, а

¹ У части груженых вагонов центр тяжести размещенного груза может быть смещен от центра вагона на некоторую величину в сторону торцевых стенок, что может вызывать неравномерную нагрузку на колесные пары вагона.

также соответствует положению отцепа в момент его отрыва от состава при отсутствии усилий, задерживающих разведение расцепляемых автосцепок у смежных отцепов.

На четвертом этапе моделируется движение отцепа по перевальной части горки путем последовательного его смещения в сторону спускной части с шагом Δx от установленной на третьем этапе позиции равенства движущих сил и сил сопротивления движению до положения на горбе горки, при котором отрыв отцепа становится невозможен. Невозможность отрыва отцепа обуславливается наличием таких значительных величин сил, задерживающих разведение расцепляемых автосцепок у смежных отцепов, что впередиидущий отцеп «утягивает» за собой последующий отцеп. То есть возникает такая ситуация, что последующий отцеп отрывается от состава ранее, чем предыдущий, с дальнейшим совместным скатыванием по спускной части горки двух неразъединенных отцепов.

Четвертый этап в отличие от третьего характеризуется появлением новой дополнительной силы – *силы сопротивления разъединению автосцепок* F^a . Наличие новой действующей силы приводит к появлению дополнительного слагаемого к суммарной силе сопротивления движению отцепа $W^{\text{сумм}}$, что вызывает изменение выражения (2.11), обуславливающее возможность отрыва отцепа, до следующего вида:

$$\sum_{k=1}^{n_b} F_k^{\text{пр}} = \sum_{k=1}^{n_b} W_k^{\text{сумм}} + F^a, \quad (2.19)$$

где F^a – проекция на горизонтальную ось *силы сопротивления разъединению автосцепок*, возникающей в их контуре зацепления у смежных отцепов, Н.

В ходе моделирования на четвертом этапе определяются координаты точек отрыва x_0 , соответствующие положениям отцепа в момент его отрыва от состава, при различных *силах сопротивления разъединению автосцепок* F^a (рисунок 2.7). Сила сопротивления разъединению автосцепок F^a изменяется с заданным шагом ΔF^a от нуля, что соответствует положению отцепа в момент окончания третьего этапа моделирования, до некоторой предельной величины, соответствующей такому положению отцепа на горбе горки, когда отрыв становится уже невозможен.



Рисунок 2.7 – Расчетная схема для определения положения отцепы, состоящего из одиночного вагона, в момент его отрыва от состава при наличии сил F^a

Предельное значение силы сопротивления $F^{a(I)}$ определяется последовательным смещением отцепы в сторону спусковой части до наступления следующего условия:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n_{в(I)}} F_k^{np(I)} - \sum_{k=1}^{n_{в(I)}} W_k^{сумм(I)} - F^{a(I)} \leq 0, \\ \sum_{k=1}^{n_{в(II)}} F_k^{np(II)} + F^{a(I)} - \sum_{k=1}^{n_{в(II)}} W_k^{сумм(II)} - F^{a(II)} \geq 0, \end{cases} \quad (2.20)$$

где $F_k^{np(I)}, W_k^{сумм(I)}$ – проекции сил на горизонтальную ось, действующих на первый отцеп, Н;

$F_k^{np(II)}, W_k^{сумм(II)}$ – проекции сил на горизонтальную ось, действующих на второй отцеп, Н;

$F^{a(I)}$ – сила сопротивления разъединению автосцепок, возникающая в контуре зацепления у автосцепок вагонов, соединяющих первый и второй отцепы, Н;

$F^{a(II)}$ – сила сопротивления разъединению автосцепок, возникающая в контуре зацепления у автосцепок вагонов, соединяющих второй и третий отцепы, Н;

$n_{в(I)}$ и $n_{в(II)}$ – число вагонов в первом и втором отцепках.

В исследовательских целях силу сопротивления разъединению автосцепок $F^{a(II)}$, возникающую в контуре зацепления у автосцепок вагонов, соединяющих

второй и третий отцепы, целесообразно принять равной нулю. Тогда для отцепов, состоящих из одного четырехосного вагона, а также с учетом перехода с абсолютных величин сил на удельные, условие (2.20) можно упростить до вида:

$$\begin{cases} -(i_1^I + i_2^I + i_3^I + i_4^I) - \sum w^I - w_a^I \leq 0, \\ -(i_1^{II} + i_2^{II} + i_3^{II} + i_4^{II}) + w_a^I - \sum w^{II} \geq 0, \end{cases} \quad (2.21)$$

где i_i^I и i_i^{II} – значения крутизны уклонов продольного профиля пути на горбе горки под i -ми осями вагона первого и второго отцепа соответственно (знак минус принимается при ускоряющем воздействии уклона на отцеп), ‰;

$\sum w^I$ и $\sum w^{II}$ – суммарное удельное сопротивление движению, складывающееся из величин основного удельного сопротивления движению, удельного сопротивления движению от воздушной среды и ветра, удельного сопротивления от стрелочных переводов и кривых, а также удельного сопротивления от воздействия вагонных замедлителей, соответственно для первого и второго отцепа, Н/кН;

w_a^I – удельное сопротивление разъединению автосцепок, возникающее в контуре зацепления у автосцепок вагонов, соединяющих первый и второй отцепы, Н/кН.

После выполнения условий выражения (2.20) или (2.21) моделирование процесса отрыва отцепа прекращается. Последнее достигнутое значение величины w_a считается предельным, при котором отрыв отцепа уже невозможен.

Последним этапом моделирования является формирование выходных данных, отражающих результаты моделирования. Это таблица координат положений отцепа в момент его отрыва от состава, соответствующих ряду значений *силы сопротивления разъединению автосцепок* (F^a и w_a) от нуля до предельного значения, при котором отрыв уже невозможен из-за утягивания за собой последующего отцепа.

Блок-схема алгоритма определения координат положений отцепов в момент их отрыва от состава, определяющего работу имитационной модели, представлена на рисунке 2.8.

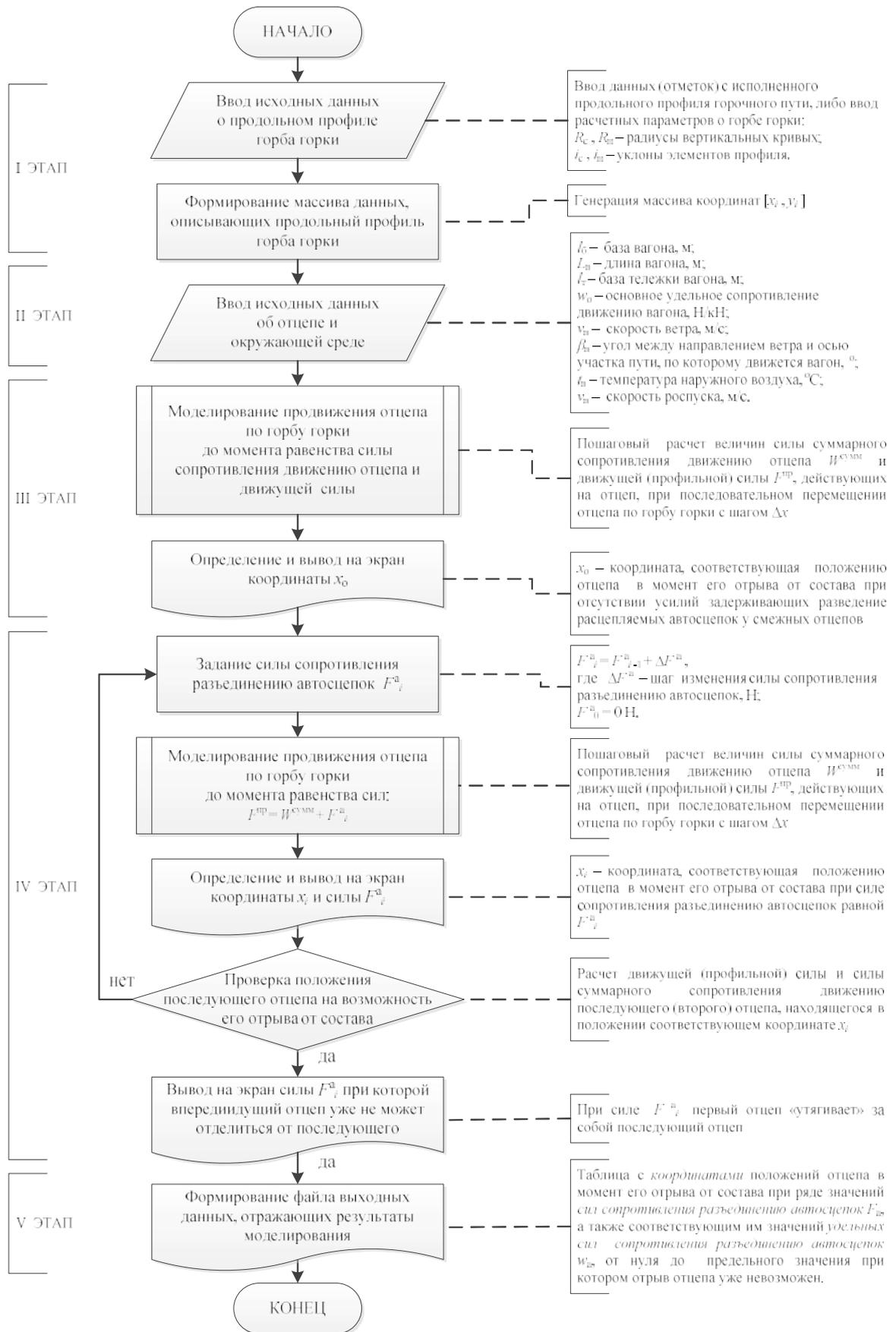


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритма работы имитационной модели при определении координат положений отцепов в момент их отрыва от состава

По заданному алгоритму была разработана программа для ЭВМ «Горб горки – Отрыв отцепов», позволяющая моделировать процесс отрыва отцепов, а также получать совместные данные о силах во взаимодействующих автосцепках отцепов и координатах положений отцепов в момент их отрыва от состава. Программа позволяет решать исследовательские задачи, связанные с определением координат x_0 точек отрыва отцепов от состава при различных условиях, при которых величина *силы сопротивления разъединению автосцепок* (F^a и w_a) задается в пределах от нуля до значений, при которых отрыв впередиидущего отцепа от состава становится невозможен. Кроме этого, возможно решение и обратных исследовательских задач, т. е. связанных с определением величины *силы сопротивления разъединению автосцепок* (F^a и w_a) при известных координатах x_0 положений отцепов при отрыве их от состава, полученных на эксплуатируемых горках с определенным продольным профилем перевальной части, а также известных параметрах отцепа (совокупности масс, ходовых свойств и конструкции вагонов, входящих в отцеп) и условий внешней среды.

2.2.3 Моделирование отрыва одновагонных отцепов от состава

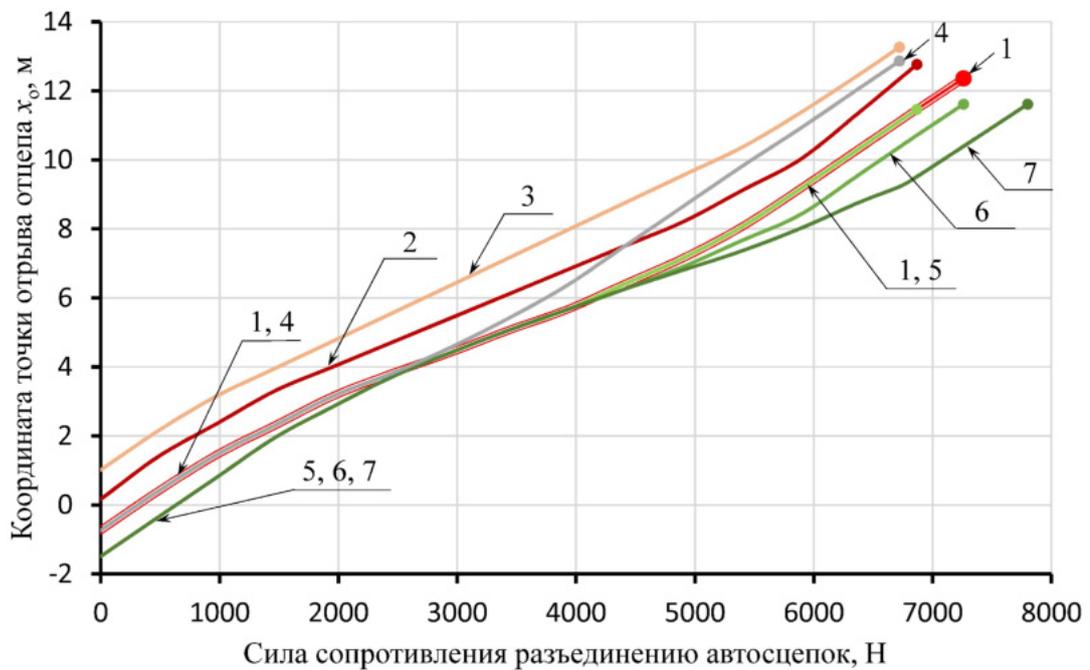
С использованием разработанной имитационной модели проведен ряд экспериментов и получены зависимости координат x_0 от задерживающих усилий в расцепленных автосцепках и параметров отдельных элементов профиля перевальной части горки при неизменных параметрах других элементов.

При эксплуатации горок наиболее неблагоприятные условия при отрыве отцепов от состава возникают при следующем сочетании отцепов: одиночный вагон ОХ (с очень хорошими ходовыми качествами) следует за одиночным порожним вагоном ОП (с очень плохими ходовыми качествами). Для данного и ряда других сочетаний следования отцепов были рассмотрены различные варианты конструкции профиля горба горки, в том числе и нетиповые, часть из которых представлена в таблице 2.4, а результаты исследований отражены на рисунках 2.9 и 2.10.

Таблица 2.4 – Конфигурации продольного профиля перевальной части горки

Вариант конфигурации профиля	Конструктивные параметры элементов продольного профиля перевальной части горки					
	i_n , ‰	R_n , м	i_p , ‰	l_p , м	R_c , м	i_c , ‰
1	8	350	–	–	250	47
2	8	350	–	–	300	47
3	8	350	–	–	350	47
4	8	350	–	–	250	40
5	8	350	5	10	250	47
6	16	350	5	10	250	50
7	16	350	5	10	250	55
8	20	350	–	–	250	35
9	20	350	–	–	300	35

Примечание: i_n – крутизна противоуклона, ‰; i_p – уклон разделительного элемента на горбе горки, ‰; i_c – уклон скоростного элемента, ‰; R_n , R_c – радиусы вертикальных кривых со стороны надвижной и спускной части соответственно, м; l_p – длина разделительного элемента, м.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – варианты конфигурации горба горки, приведенные в таблице 2.4

Рисунок 2.9 – Влияние сил сопротивления разъединению автосцепок на положение точки отрыва одновагонного отцепы (порожний крытый вагон) от состава при различных конфигурациях перевальной части горки

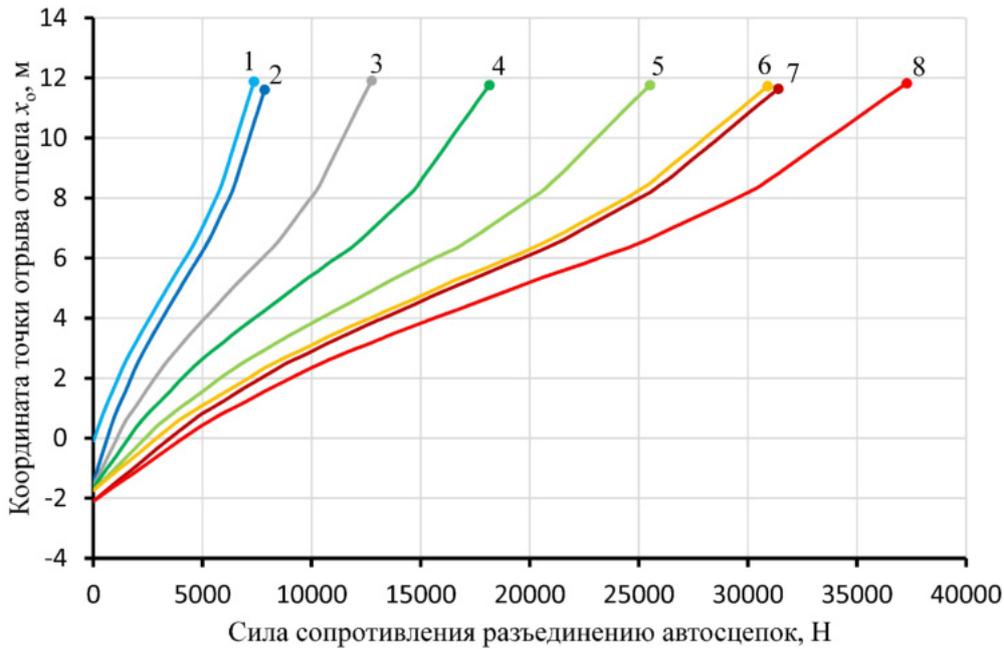


Рисунок 2.10 – Влияние сил сопротивления разъединению автосцепок на положение координаты точки отрыва отцепа (одиночный полувагон) при различных массе и основном удельном сопротивлении вагона

По результатам проведенных экспериментов получены следующие выводы:

1. Рассеивание координат точек отрыва одновагонных отцепов при отсутствии сил сопротивления разъединению автосцепок незначительное (около 2 м) и не отражает реальной ситуации на горке с запаздыванием отделения отцепов.

2. Силы сопротивления при разъединении автосцепок вагонов оказывают значительное влияние на положение отцепов в момент отрыва от состава, удаляя точку отрыва в сторону спускной части горки. Как видно из рисунка 2.10, эти силы обуславливают более широкое поле рассеивания координат точек отрыва отцепов, достигающее значений 14 м. Поэтому указанное сопротивление следует учитывать как дополнительное к суммарному сопротивлению движению отцепа до момента фактического отрыва отцепа от состава.

3. Изменение радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части с 250 до 300 м, а также с 300 до 350 м удаляет точку отделения отцепа при любых значениях силы сопротивления разъединению автосцепок на 0,3–2 м для любых

типов вагонов. Большее значение удаления соответствует большему основному удельному сопротивлению движению.

4. Величина первого скоростного уклона не влияет на положение точки отрыва одновагонного отцепа от состава при наличии небольших сил сопротивления движению и разъединению автосцепок (до 10 Н/кН). При появлении значительных сил сопротивления разъединению автосцепок величина первого скоростного уклона может оказывать заметное влияние на положение точки отрыва отцепа от состава, особенно для легковесных вагонов. Поэтому для уменьшения разброса координат точек отрыва первый скоростной элемент целесообразно проектировать наибольшей крутизны.

5. Изменение величины радиуса вертикальной кривой со стороны надвигной части с 350 до 400 м незначительно (0,1–0,3 м) влияет на положение точки отделения отцепа при любых значениях силы сопротивления в автосцепке и любых типах вагонов.

6. Увеличение величины противоуклона задерживает отрыв вагона (на 0,25–0,3 м на 1 ‰), но уменьшает разброс координат точек отрыва.

7. Величина предельной силы сопротивления разъединению автосцепок, при которой впередиидущий отцеп из одиночного вагона уже не отделяется от последующего одновагонного отцепа, утягивая его за собой, зависит в основном от массы вагона и лежит в пределах от 6000 Н (порожний четырехосный) до 70000 Н (груженный восьмиосный), при этом величина *удельного сопротивления при разъединении автосцепок вагонов* w_a соответственно будет составлять от 25 до 40 Н/кН.

8. Зависимость положения точки отрыва заданного отцепа от сил сопротивления в автосцепках можно приближенно считать линейной при неизменной конфигурации горба горки. Параметры этой линейной зависимости будут зависеть в основном только от массы отцепа (см. рисунок 2.10). Влияние на указанную зависимость основного удельного сопротивления движению вагона незначительно.

Выводы по второй главе

По результатам выполненных во второй главе исследований получены следующие выводы:

1. Разработан новый аналитический метод расчета координат одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава на горбе горки. Метод устанавливает соотношения между влияющими факторами и позволяет определять координаты точек отрыва с точностью, сопоставимой с точностью метода имитационного моделирования при представлении отцепов в виде шарнирно-осевой модели.

2. Разработана имитационная модель для определения положения отцепов в момент их отрыва от состава при роспуске, основанная на шарнирно-осевом представлении отцепов, которая учитывает дополнительное сопротивление, возникающее в контурах зацепления разъединяемых автосцепок. Имитационная модель позволяет определять влияние возможных сил сопротивления разъединению автосцепок и параметров продольного профиля горба горки на положение отцепов в момент их отрыва от состава.

3. На основании моделирования отрыва одновагонных отцепов от состава на «идеальном» профиле (очертание продольного профиля, соответствующее Правилам и нормам проектирования сортировочных устройств и не имеющее местных искажений), установлено следующее:

– влияние конструктивных параметров перевальной части горки (в пределах установленных нормами границ) на рассеивание координат точек отрыва отцепов при отсутствии сил сопротивления при разъединении автосцепок незначительное и не объясняет негативных явлений, имеющих место при роспуске на эксплуатируемых сортировочных горках;

– широкое поле рассеивания координат точек отрыва отцепов от состава определяется наличием не учитываемых в настоящее время сил сопротивления при разъединении автосцепок.

4. Для повышения качества результатов проектирования новых и реконструкции существующих сортировочных горок предлагается ввести в теорию го-

рочных расчетов новый вид сопротивления – *удельное сопротивление при разъединении автосцепок вагонов* w_a . Указанное сопротивление необходимо учитывать как дополнительное к суммарному удельному сопротивлению движению отцепа до момента фактического отрыва отцепа от состава.

5. Для экспериментального нахождения сил сопротивления разъединению автосцепок на эксплуатируемых горках и определении степени их влияния на сортировочный процесс может использоваться разработанная имитационная модель, позволяющая исследовать процесс отрыва на сортировочных горках с перевальной частью произвольной конфигурации.

Таким образом, для решения ряда прикладных и научно-исследовательских задач, в которых требуется определение положений отцепов в момент их отрыва от состава, предлагается использовать разработанные в данной главе аналитический метод расчета или имитационную модель при условии ввода дополнительно слагаемого к суммарному удельному сопротивлению движению отцепа $\sum w$ – *удельного сопротивления разъединению автосцепок* w_a .

3 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРЫВА ОТЦЕПОВ ОТ СОСТАВА НА ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК

3.1 Методика проведения натуральных наблюдений за процессом отделения отцепов на перевальной части горки

Основной задачей исследований является выявление основных факторов, влияющих на отрыв отцепов, и определение степени их значимости для получения выводного теоретического знания (служащего основой для последующего практического применения).

При натуральных наблюдениях за начало свободного скатывания отцепов принимается момент окончания разъединения автосцепок вагонов, расцепляемых перед горбом горки составителем. За координату точки отрыва x_0 принято расстояние от фактической вершины горки до оси зацепления автосцепки последнего вагона в отцепе (хвоста отцепа) в момент его отрыва от надвигаемого состава (рисунок 3.1).

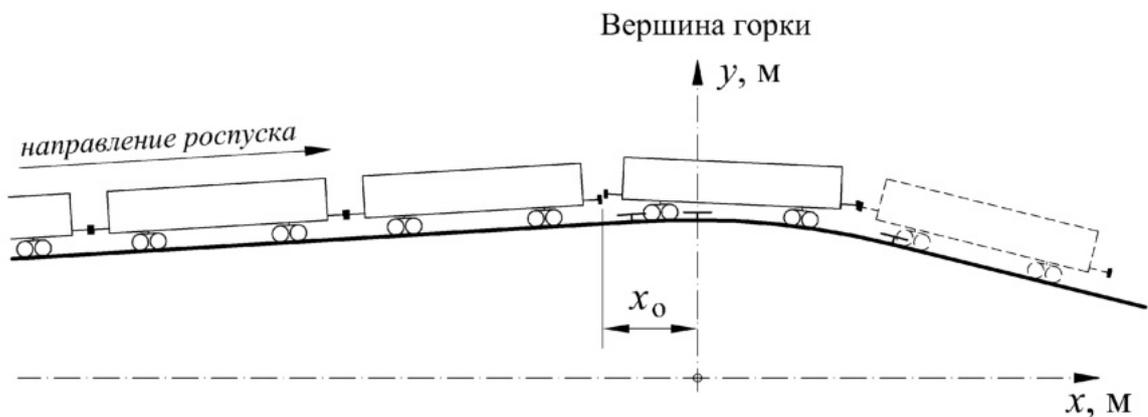


Рисунок 3.1 – Расчетная схема для определения координаты x_0 точки отрыва отцепа от состава при проведении натуральных исследований

Основные положения и условия проведения натуральных исследований:

1. Для каждой горки или отдельного горочного пути очертание фактических продольных профилей горочных путей перевальной части составлялось по материалам инструментальной съемки.

2. Для минимизации влияния воздушной среды и ветра на результаты экспериментов дни и периоды проведения наблюдений выбирались из условия воздействия на скатывающиеся отцепы ветра со скоростью не более 3 м/с. Данное допущение позволяет оценивать погрешность, связанную с воздействием воздушной среды и ветра, в определении координаты отрыва x_0 не более 0,5 м.

3. Отдельное внимание уделялось исследованию влияния на отрыв отцепов температуры окружающей среды, а также наличия осадков.

4. Наблюдение за процессом отрыва и замеры координат производились для всех скатывающихся отцепов. Дополнительные исследования и дальнейшая обработка полученных результатов проводились только с отцепами, состоящими из вагонов типовых конструкций или вагонов, конструктивные параметры которых известны или могут быть определены по номеру вагона.

Порядок организации и проведения натурных исследований на перевальной части сортировочной горки следующий:

1. Проводится анализ конструктивных особенностей плана и профиля перевальной части выбранной для исследования горки.

2. Выбираются и анализируются продольные профили горочных путей перевальной части, составленные по материалам последней инструментальной съемки, выполненной с шагом не менее 2 м.

3. Непосредственно на горочных путях определяется и отмечается участок, соответствующий фактической вершине горки, который сопоставляется с продольным профилем. Производится оценка длины зоны возможного отделения от состава, как одиночных вагонов, так и отцепов из нескольких вагонов, и устанавливаются ее границы.

4. Устанавливается положение системы координат. За начало системы координат, как правило, принимается фактическая вершина горки.

5. Перед проведением замеров на обочине горочного пути в зоне возможного отделения отцепов от состава формируется шкала координат.

6. Перед началом расформирования каждого состава в журнал заносится информация о параметрах окружающей среды (температура, скорость и направ-

ление ветра, облачность и наличие осадков), номере горочного пути, на котором будет производиться расцепка вагонов, а также производятся пометки на основании данных сортировочного листка соответствующего состава.

7. Процесс разъединения автосцепок контролируется и фиксируется¹ экспериментатором. Координаты точек отрыва считываются визуально в момент начала свободного скатывания отцепов.

8. В процессе расформирования состава заносятся переданные результаты измерения координаты точек отрыва отцепов, а также масса отцепа, тип и количество вагонов в нем и другие вспомогательные записи. После расформирования каждого состава в журнал подшивается его сортировочный листок, а в случае изменения параметров окружающей среды заносится соответствующая информация.

9. После окончания проведения серии наблюдений и замеров производится камеральная обработка результатов.

Выполнена оценка погрешностей результатов измерений координат точек отрыва отцепов:

- погрешности из систематических и случайных составляющих, связанной с неточностью выполнения измерений координат;
- погрешности, связанной с неопределенным во времени характером воздействия воздушной среды и ветра на очередной скатываемый отцеп.

Указанные погрешности вызваны несколькими независимыми друг от друга случайными величинами, поэтому суммарная абсолютная погрешность определения координат точек отрыва определена по формуле:

$$\Delta x_o = \sqrt{\Delta x_k^2 + \Delta x_{cb}^2}, \quad (3.1)$$

где Δx_k – максимальная абсолютная погрешность, связанная с неточностью выполнения измерений координат, м;

¹ Фиксирование положения точки отрыва отцепа производится в момент разведения автосцепок, визуально определяемого самопроизвольным поворотом валика подъемника на боковине корпуса автосцепки, расцепленной перед горбом горки горочным составителем. Поворот валика подъемника сопровождается выпадением из кармана корпуса автосцепки замка, находящегося там в поднятом положении, в ее зев. При этом выпадение замка сопровождается характерным звуком, который служит дополнительным сигналом, помогающим более достоверно определять момент разъединения автосцепок вагонов.

$\Delta x_{\text{св}}$ – максимальная абсолютная погрешность координат точек отрыва, связанная с воздействием воздушной среды и ветра на отцепы, м.

Максимальная абсолютная погрешность, связанная с неточностью выполнения измерений координат, при прямых измерениях определяется по формуле:

$$\Delta x_{\text{к}} = \Delta x_{\text{инстр}} + \Delta x_{\text{отсч}}, \quad (3.2)$$

где $\Delta x_{\text{инстр}}$ – абсолютная инструментальная погрешность, м;

$\Delta x_{\text{отсч}}$ – абсолютная погрешность отсчета, м.

Инструментальная погрешность $\Delta x_{\text{инстр}}$ средства измерения появляется из-за неточности выполнения разбивочных работ при формировании шкалы координат. Указанная погрешность относится к систематическим и по условиям выполнения разбивочных работ не может принимать абсолютное значение более 0,05 м. Погрешность отсчета $\Delta x_{\text{отсч}}$ является случайной и принимается равной половине цены деления шкалы координат, т. е. равна половине расстояния между укладываемыми вдоль железнодорожного пути маркерами. В этом случае максимальная абсолютная погрешность, связанная с неточностью выполнения измерений координат, согласно формуле 3.2 составит:

$$\Delta x_{\text{к}} = 0,05 + 0,25 = 0,3 \text{ м.}$$

Погрешность $\Delta x_{\text{св}}$ возникает из-за турбулентности воздушных потоков в приземном слое и переменной скорости роспуска, в результате чего воздействие ветра по скорости и направлению на каждый последующий отцеп в процессе их отделения от состава носит неопределенный характер и является случайным [89]. Точное определение указанной погрешности для каких-то конкретных условий проведения исследований является трудновыполнимой задачей. Поэтому оценка производилась по ее максимально возможному значению, которое для одновагонных¹ отцепов можно определить, преобразуя аналитическое выражение для определения координаты точек отрыва отцепов (2.13), по формуле:

$$\Delta x_{\text{св}} = 2R_{\text{с}} w_{\text{св}}^{\text{max}} \cdot 10^{-3}, \quad (3.3)$$

¹ Для отцепов из нескольких вагонов величина $\Delta x_{\text{св}}$ будет существенно ниже.

где $w_{св}$ – удельное сопротивление движению вагона (отцепа) от воздушной среды и ветра, Н/кН.

В периоды проведения наблюдений скорость ветра допускалась не более 3 м/с, что даже в неблагоприятных условиях¹ ограничивает значение максимального удельного сопротивления от воздушной среды и ветра, согласно [110] до 1 Н/кН при встречном и до минус 0,5 Н/кН при попутном ветре. В результате этого максимальная абсолютная погрешность $\Delta x_{св}$ при определении координаты отрыва, связанная с воздействием воздушной среды и ветра, согласно формуле (3.3) составит не более 0,5 м при встречном и не более 0,25 м при попутном ветре.

Таким образом, суммарная абсолютная погрешность в определении координат точек отрыва отцепа от состава, согласно формуле (3.2) составит:

$$\Delta x_0 = \sqrt{0,3^2 + 0,5^2} = 0,583 \approx 0,6 \text{ м (для встречного ветра);}$$

$$\Delta x_0 = \sqrt{0,3^2 + 0,25^2} = 0,391 \approx 0,4 \text{ м (для попутного ветра).}$$

Следовательно, с учетом указанных направлений ветров и принятого направления шкалы отчета, координаты точек отрыва, м, с учетом абсолютной погрешности будут определяться по формуле:

$$x_0 = x_0 \pm \Delta x_0 = x_0 \left\{ \begin{array}{l} + 0,6 \\ - 0,4 \end{array} \right\}. \quad (3.4)$$

Согласно формуле (3.4) диапазон разброса координат точек отрыва для одновагонного порожнего отцепа в неблагоприятных условиях с учетом погрешности измерений может составлять до 1 м (отцеп может оторваться раньше расчетной точки отрыва до 0,4 м или проследовать далее до 0,6 м). Диапазон разброса координат точек отрыва для других весовых категорий одновагонных отцепов, а также отцепов, состоящих из нескольких вагонов, будет меньше.

¹ Свободное скатывание отцепа, состоящего из одного порожнего крытого вагона, при воздействии на него встречного ветра скоростью 3 м/с с углом обдувания от 0 до 30°.

3.2 Результаты проведения натуральных исследований на эксплуатируемых сортировочных горках

В качестве основного объекта исследования была выбрана четная сортировочная горка средней мощности, располагающаяся на двухсторонней сортировочной ст. «С», являющейся одной из крупнейших сортировочных станций в России.

Горка имеет следующие особенности:

- интенсивный роспуск составов;
- значительное число в общем отцепопотоке одновагонных отцепов, состоящих из вагонов типовых конструкций;
- незначительные отклонения продольного профиля перевальной части рассматриваемой горки от нормативного очертания.

Результаты проведенных наблюдений были сгруппированы по типам вагонов, месту и условиям наблюдения. В качестве примера в таблице 3.1 приведены результаты наблюдений для четной горки ст. «С», имеющей два подвижных пути, два горба и один спускной путь. Продольный профиль перевальной части данной горки имеет наиболее благоприятные параметры, допускаемые Правилами и нормами проектирования сортировочных устройств [110], способствующие своевременному и динамичному отрыву короткобазных вагонов. На период проведения натуральных наблюдений были определены следующие основные параметры продольного профиля горба горки:

- наличие профильного разделительного элемента, согласно [110];
- крутизна уклона профильного разделительного элемента между подвижной и спускной частью приблизительно равна 5 ‰;
- крутизна уклона первого скоростного элемента спускной части горки приблизительно равна 50 ‰;
- радиус вертикальной кривой при сопряжении профиля на горбе со стороны спускной части приблизительно равен 250 м.

Таблица 3.1 – Числовые характеристики статистического распределения координат точек отрыва одновагонных отцепов, состоящих из типовых одиночных полувагонов, на четной сортировочной горке ст. «С» при различных погодных-климатических условиях

Дата проведения наблюдений	Погодно-климатические условия	Результаты наблюдений					
		Расстояние* от вершины горки до точек отрыва отцепов из одиночных типовых полувагонов, согласно существующей теории расчета сортировочных горок, (x_0), м		Среднее значение x_0 , м	Стандартное отклонение для x_0 , м	Количество наблюдаемых отрывов отцепов из одиночных полувагонов, шт.	Количество «нерасцепов» (утягиваний), не связанных с неисправностью механизма автоцепки, у отцепов из полувагонов, шт.
		при благоприятных условиях**	при неблагоприятных условиях***				
17.02	Пасмурно; ветер попутный (Ю) 2–3 м/с; температура окружающей среды $t_{cp} = -14...-17$ °С	$\approx -8...-7,5$	$\approx -6,5...-5,5$	-2,84	1,04	53	1
6.05	Пасмурно; ветер попутный (Ю) 2–3 м/с; $t_{cp} = +11...+14$ °С	$\approx -8...-7,5$	$\approx -6,5...-5,5$	-2,38	1,28	48	1
14.05	Ясно; ветер попутный (В) 1–2 м/с; $t_{cp} = +25...+28$ °С	$\approx -8...-7,5$	$\approx -6,5...-5,5$	-1,62	1,49	109	3
18.05	Ясно; ветер попутный (Ю-В) 0–3 м/с; $t_{cp} = +32...+36$ °С	$\approx -8...-7,5$	$\approx -6,5...-5,5$	-0,75	1,54	90	3
25.05	Пасмурно; ветер встречный (С-В) 1–3 м/с; $t_{cp} = +13...+15$ °С	$\approx -8...-7,5$	$\approx -6,5...-5,5$	-2,32	1,20	54	0
<p>* – расстояние от вершины горки x_0 соответствует расчетной схеме, представленной на рисунке 3.1. ** – основное удельное сопротивление движению отцепа 0,5 кгс/тс, ветер попутный 3 м/с. *** – основное удельное сопротивление движению отцепа 4,5 кгс/тс, ветер встречный 3 м/с.</p>							

3.3 Сопоставление результатов натуральных наблюдений и теоретических исследований процесса отрыва отцепов на перевальной части горки

Установлено, что в процессе отделения отцепов имеют место случаи запаздывания разъединения расцепленных автосцепок [101]. В сухую и жаркую погоду количество таких случаев резко возрастает, что зачастую требует сопровождения горочным составителем отцепов из одиночных вагонов до момента их отрыва от состава даже за вершину горки. В ряде случаев для недопущения «нагонов» на спускной части горки производят вынужденную остановку роспуска. В качестве примера представлены гистограммы относительных частот координат точек отрыва отцепов (рисунки 3.2–3.6), состоящих из одиночных полувагонов типовой конструкции, при роспуске с горочного пути № 5 на четной горке ст. «С» для статистических рядов, соответствующих температурам окружающего воздуха, которые представлены в таблице 3.2.

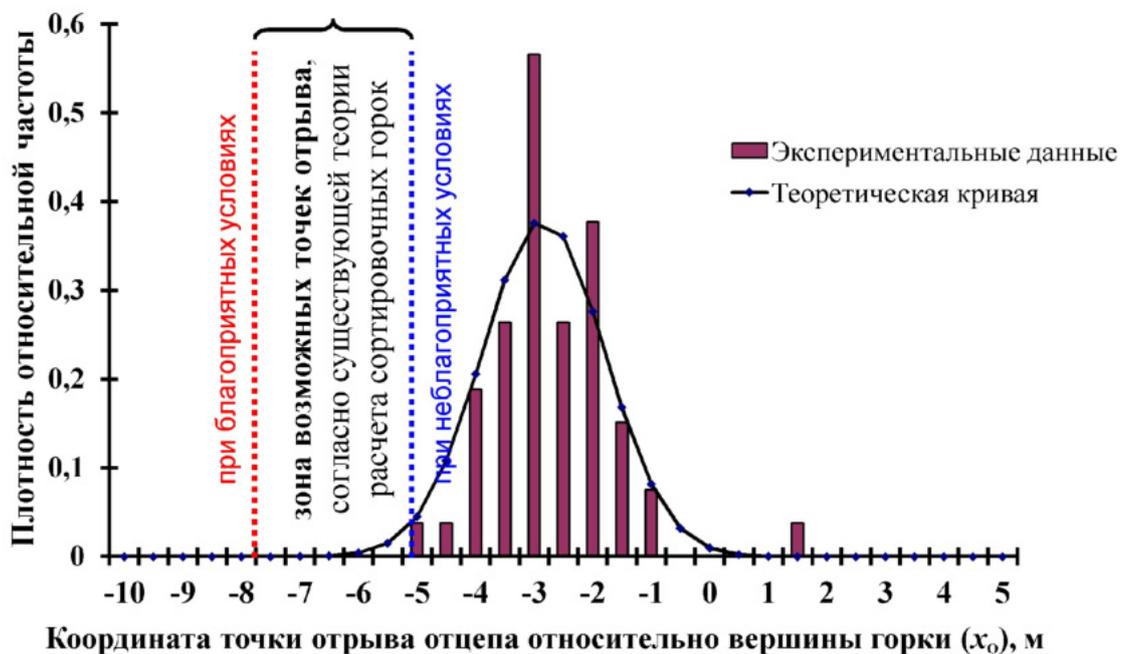


Рисунок 3.2 – Гистограмма относительных частот координат точек отрыва одиночных типовых полувагонов на четной горке ст. «С» при температуре окружающего воздуха $-14\dots-17\text{ }^{\circ}\text{C}$

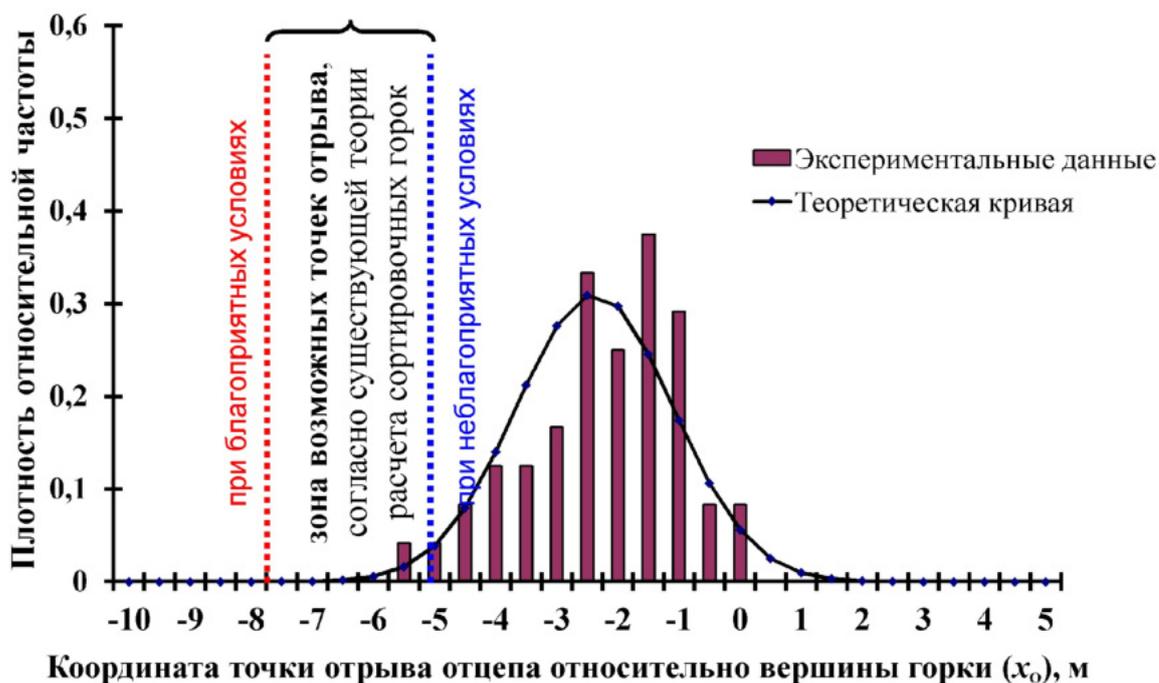


Рисунок 3.3 – Гистограмма относительных частот координат точек отрыва одиночных типовых полувагонов на четной горке ст. «С» при температуре окружающего воздуха +11...+14 °С

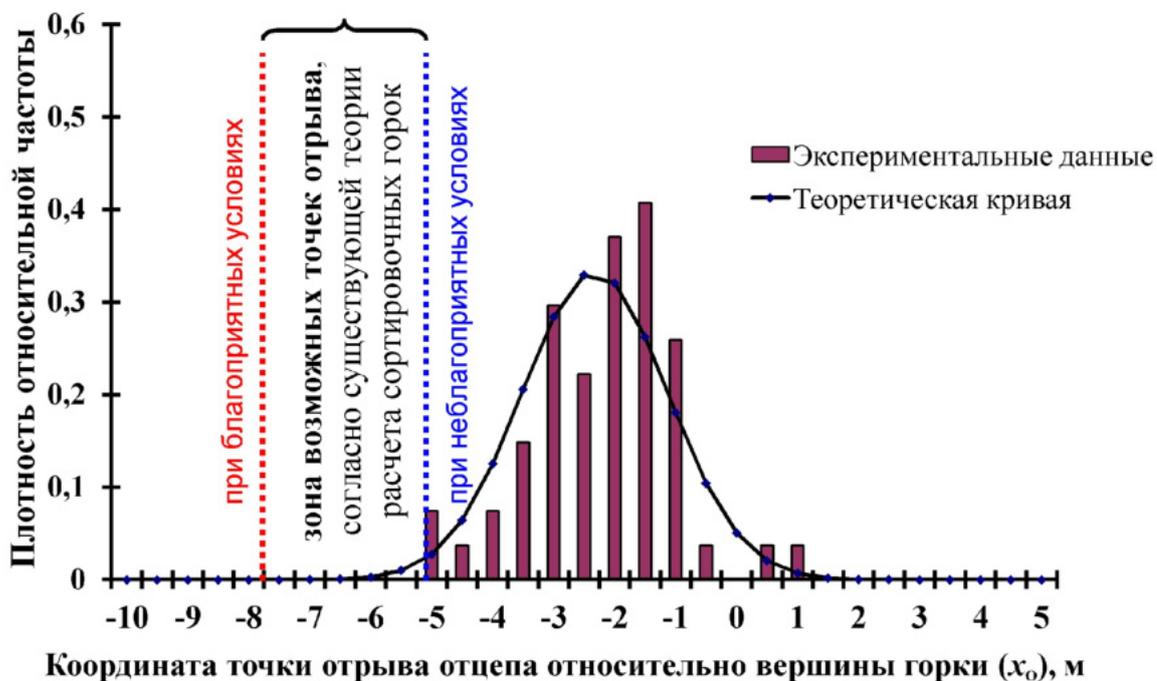


Рисунок 3.4 – Гистограмма относительных частот координат точек отрыва одиночных типовых полувагонов на четной горке ст. «С» при температуре окружающего воздуха +13...+15 °С

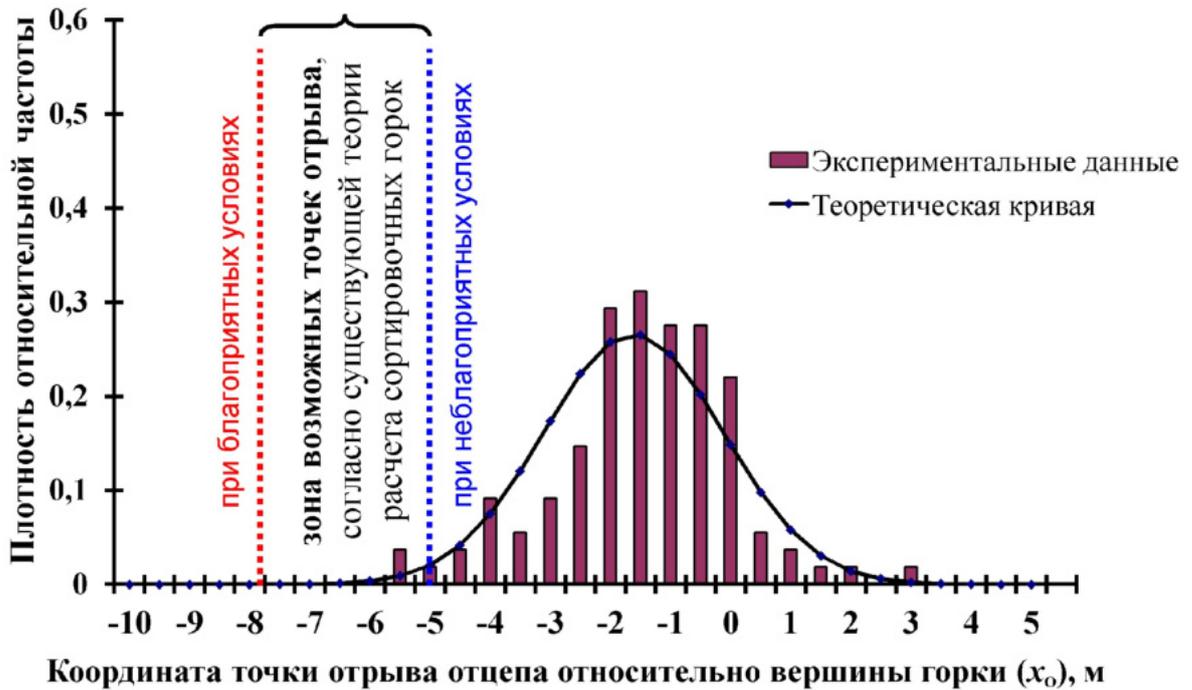


Рисунок 3.5 – Гистограмма относительных частот координат точек отрыва одиночных типовых полувагонов на четной горке ст. «С» при температуре окружающего воздуха +25...+28 °С

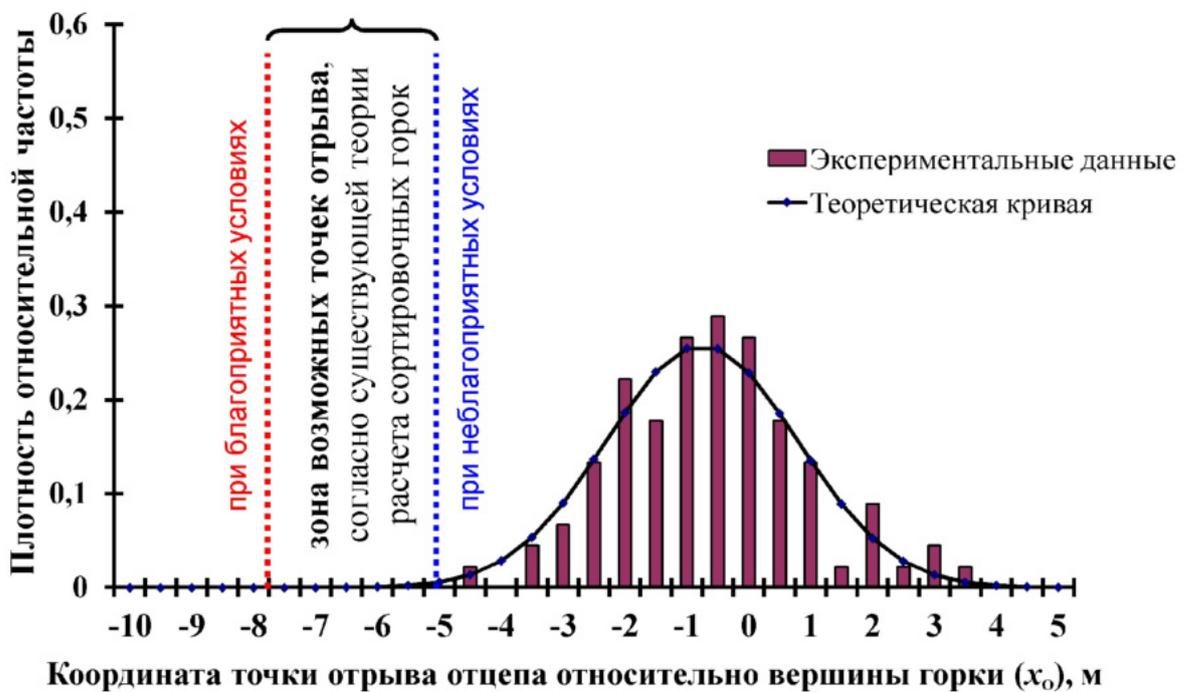


Рисунок 3.6 – Гистограмма относительных частот координат точек отрыва одиночных типовых полувагонов на четной горке ст. «С» при температуре окружающего воздуха +32...+36 °С

При низких температурах в зимних условиях трудности с разъединением автосцепок, как правило, отсутствуют, и в целом процесс отделения отцепов более стабильный. Появление осадков в виде дождя также благоприятствует лучшему отделению отцепов от состава. Связано это с тем, что наличие дождя приводит к смачиванию поверхностей контура зацепления автосцепок, вызывая уменьшение коэффициента трения, что способствует улучшению условий их разведения.

Полученные распределения показывают, что существует выраженная зависимость дальности точек отрыва отцепов от температуры окружающей среды. Кроме этого, поле рассеивания координат точек отрыва полувагонов более широкое, чем это следует из Правил и норм проектирования сортировочных устройств [110]. Действующая теория предполагает, что рассеивание координат может быть вызвано только разбросом значений суммарного удельного сопротивления движению. В свою очередь, суммарное сопротивление движению отцепов на перевальной части горки складывается из случайных величин основного удельного сопротивления движению, сопротивления движению от воздушной среды и ветра, а также сопротивления от стрелок и кривых. Следовательно, для условий проводимых наблюдений, рассеивание координат точек отрыва для одиночных однотипных отцепов не должно превышать 3–4 м [107], а по факту оно значительно больше и может превышать 10 м.

Установлено, что фактические координаты точек отрыва отцепов, как правило, удалены в сторону спускной части от расчетных теоретических координат. Это свидетельствует о том, что в контурах зацепления расцепленных автосцепок возникают усилия, задерживающие свободный и своевременный отрыв. Как показали результаты имитационного моделирования с использованием программы «Горб горки – Отрыв отцепов» (см. п. 2.2) значения этих усилий в момент отрыва, как правило, для порожних одиночных вагонов составляют не менее 1000 Н, а для полновесных груженых вагонов не менее 3000 Н (или 3-5 Н/кН). В ряде случаев задерживающая сила в автосцепках превышала значения 10000 Н, иногда достигая критических значений, при которых отрыв вагонов не фиксировался, что приводило к «утягиванию» за собой последующего отцепа и нарушало программу роспуска.

Наличие существенной разницы между возникающими усилиями в разъединяемых автосцепках для груженых и порожних отцепов свидетельствует о достаточно сложных процессах, происходящих при их отделении от состава. Натурные наблюдения позволили установить, что существенное влияние на фиксируемые значения оказывает скорость роспуска. Чем выше скорость роспуска, тем дальше в сторону спускной части смещаются положения точек отрыва и, соответственно, выше значения продольных задерживающих сил в момент отрыва. Это связано с тем, что процесс разъединения автосцепок проходит не мгновенно, а занимает некоторое время, тем самым задерживая свободный отрыв отцепов.

Отцеп большей массы, при одном и том же положении точки отрыва по сравнению с отцепом меньшей массы и прочих равных условиях, имеет большую профильную ускоряющую силу. Это свидетельствует о наличии прямой зависимости возникающих предельных сил сопротивления в разъединяемых автосцепках от массы отцепа.

Установлено, что координата положения отцепа в момент начала его свободного скатывания, является случайной величиной, имеющей широкое поле рассеивания и в основном зависит от следующих факторов:

- числа вагонов в отцепе и их конструктивных параметров;
- конструктивных параметров перевальной части горки;
- ходовых свойств отцепа;
- метеорологических условий (температура воздуха, скорость и направление ветра, наличие осадков);
- состояния контуров зацепления взаимодействующих расцепленных автосцепок;
- скорости роспуска.

Также установлено, что существующие теоретические методы при определении положений точек отрыва отцепов от состава в достаточной степени учитывают только такие основные влияющие факторы, как:

- число вагонов в отцепе и их конструктивные параметры;
- конструктивные параметры перевальной части горки;

- ходовые свойства отцепа;
- скорость и направление ветра.

Все эти факторы, за исключением ходовых свойств отцепа, рассматриваются действующими Правилами и нормами проектирования сортировочных устройств [110] как неслучайные. При этом случайной составляющей, определяющей в какой-то мере разброс координат точек отрыва отцепов при имитационном моделировании, является основное удельное сопротивление движению отцепа, а также удельное сопротивление движению от кривых и стрелок.

По результатам натуральных наблюдений можно сделать вывод, что существующие методики имеют погрешность при определении положения отрыва отцепов от состава, так как в них не учитываются в полной мере силовые взаимодействия расцепленных перед горбом горки автосцепок в процессе их разведения. В результате, запаздывание отделения отцепов в реальных условиях приводит в ряде случаев к вынужденному снижению скорости роспуска ниже расчетной.

Также установлено, что воздействие ветра может оказывать влияние на разброс координат точек отрыва отцепов, в первую очередь состоящих из одиночных вагонов легкой весовой категории. Связано это со стохастической природой ветровых воздействий в процессе роспуска, которые действующая теория рассматривает в виде детерминированной модели.

В полной мере учесть процессы, происходящие при отделении отцепов от состава, можно только с использованием методов моделирования.

3.4 Практическое приложение результатов натуральных наблюдений

3.4.1 Моделирование процесса разъединения автосцепок при отделении отцепов от состава

Результаты натуральных наблюдений показывают, что за начало свободного скатывания отцепа следует принимать момент его фактического отрыва от состава, а не момент равенства движущей профильной силы суммарным силам сопротивления движению отцепа. Установлено, что процесс разъединения расцеплен-

ной перед горбом горки автосцепки при отделении отцепа от состава следует рассматривать в виде трех фаз:

1. *Фаза перехода автосцепок из сжатого состояния в равновесное.* В этой фазе происходит смена направления сил, действующих на автосцепки смежных отцепов. Данную фазу целесообразно рассматривать от момента завершения расцепки¹ сжатых автосцепок перед горбом горки до момента начала перемещения в горизонтальной плоскости малого зуба одной автосцепки относительно большого зуба другой (рисунок 3.7).

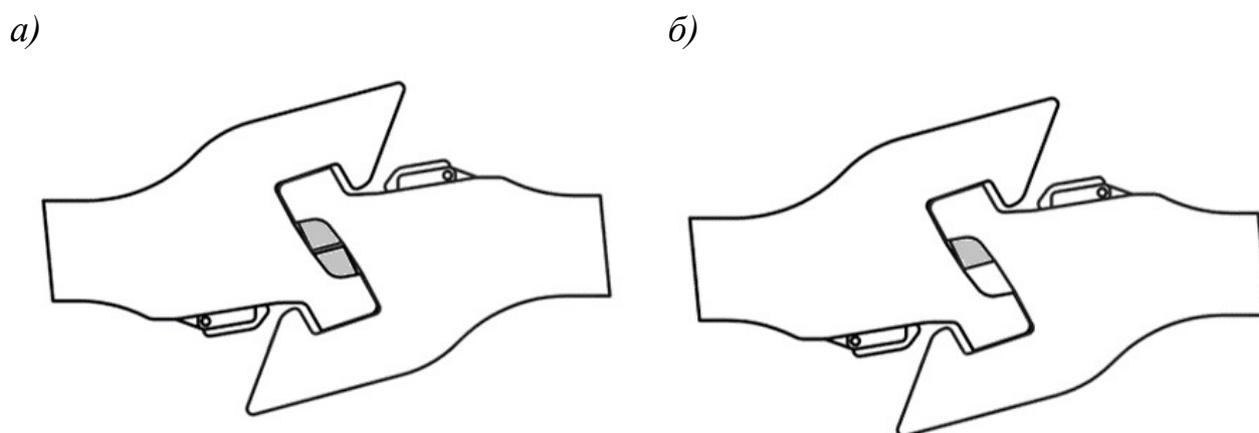


Рисунок 3.7 – Положение расцепленных автосцепок в горизонтальной плоскости:
а – до начала фазы перехода автосцепок из сжатого состояния в равновесное;
б – во время фазы перехода из сжатого состояния в равновесное

За начало первой фазы может приниматься произвольный момент времени, в котором положение отцепа соответствует любой позиции на надвигной и перевальной частях горки, при которой расцепляемые автосцепки находятся в сжатом состоянии, обеспечивающем возможность проведения расцепления составителем.

Окончанием первой фазы является момент, когда положение отцепа будет соответствовать такой позиции, при которой нарастающая величина движущей (профильной) силы $F^{пр}$, действующей на вагон, сравняется с величиной силы суммарного сопротивления движению вагона $W^{сумм}$.

¹ Расцепление, как правило, производится следующим способом. Составитель следует к межвагонному пространству смежных отцепов и, используя специальную вилку, натягивает у одной из автосцепок цепь расцепного привода, которая поворачивает валик подъемника, а вместе с ним и подъемник, который приподнимает замкодержатель и уводит замок внутрь кармана корпуса автосцепки.

2. *Фаза растягивания автосцепок.* Эта фаза характеризуется тем, что в контуре зацепления автосцепок начинает образовываться зазор S между ударными поверхностями малого зуба и зева. Растягивание может сопровождаться скольжением наружных боковых поверхностей зубьев автосцепок друг относительно друга. Фаза заканчивается прижатием друг к другу тяговых поверхностей малого и большого зубьев смежных автосцепок (рисунок 3.8, б).

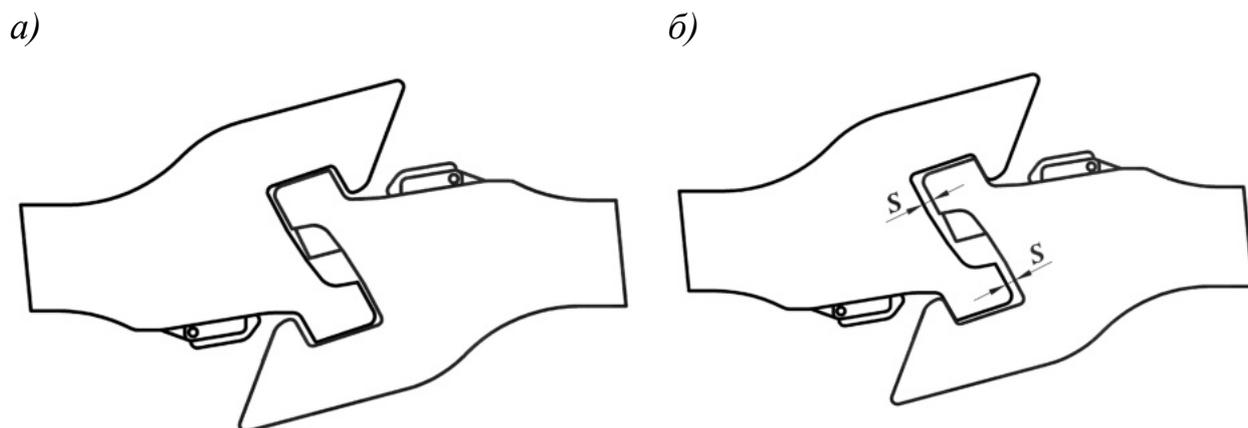


Рисунок 3.8 – Положение расцепленных автосцепок горизонтальной плоскости: а – в середине фазы растягивания автосцепок; б – в конце фазы растягивания автосцепок

Средняя длительность второй фазы составляет примерно 1 с и, как правило, не превышает 2 с. Это в первую очередь зависит от величины зазора S между контурами зацепления расцепленных автосцепок (см. рисунок 3.8, б), а также от скорости роспуска и продольного профиля горба горки. В свою очередь, зазор S – величина случайная, которая зависит от производственных допусков и износа поверхностей контура зацепления. По чертежу стандартного контура зацепления этот зазор при номинальных размерах обеих автосцепок составляет 10 мм. Однако при совпадении наибольших значений производственных допусков на тяговые и ударные поверхности автосцепки зазор S между контурами зацепления может уменьшаться до 4 мм [28, 127], а при производственных отклонениях от номинального положения в минус и износах в пределах норм у автосцепки тяговых и ударных поверхностей зазор S может достигать 22 мм [49]. Ввиду того, что изнашиваемые поверхности корпуса автосцепки должны ремонтироваться только по-

сле превышения установленной нормы допускаемых износов, возможен выпуск из ремонта автосцепок с износом рабочих поверхностей корпуса, близких к допускаемому, но не превышающим его. Такие корпуса будут дополнительно изнашиваться в период эксплуатации до поступления в следующий плановый ремонт, в результате чего износ может превысить допускаемую норму (примерно 1 мм по каждой поверхности). Принимая во внимание возможный дополнительный износ, считается, что максимальный зазор S может в эксплуатации достичь 26 мм [83].

Таким образом, величина S может принимать значения в пределах от 4 до 26 мм. Учитывая, что на величину зазора влияет большое количество случайных факторов, то целесообразно при моделировании использовать усеченный нормальный закон распределения со следующими параметрами: границы усечения распределения величины $S \in (4, 26)$ мм, средняя величина зазора $\bar{\mu}_s = 12$ мм, стандартное отклонение $\sigma_s = 2$ мм [127]. Расчет случайной величины зазора S при имитационном моделировании можно производить по формуле, мм [69]:

$$S = \bar{\mu}_s + \sigma_s \left(\sum_{i=1}^{12} R_i - 6 \right), \quad (3.5)$$

где R_i – равномерно распределенное случайное число на интервале (0, 1).

Вторая фаза заканчивается прижатием друг к другу тяговых поверхностей зубьев смежных автосцепок (см. рисунок 3.8, б). Прижатие может сопровождаться в некоторых случаях остановкой движения головы удаляющейся автосцепки с дальнейшим растягиваем межстыковых зазоров в автосцепных устройствах.

3. *Фаза разведения автосцепок.* В этой фазе малый зуб одной автосцепки постепенно выходит из зева другой автосцепки (рисунок 3.9, а). Разъединение сопровождается скольжением тяговой поверхности малого зуба по тяговой поверхности большого зуба смежных автосцепок. Двигающийся малый зуб правой автосцепки ограничивает выход в зев лапы замкодержателя левой автосцепки и в то же время сам скользит вдоль лапы замкодержателя. Фаза заканчивается выходом зубьев автосцепок из состояния зацепления и началом свободного скатывания отцепленного отцепа (см. рисунок 3.9, б). При этом в начале свободного скатывания, т. е. при выходе зубьев автосцепок из зацепления, замок и замкодержатель

левой автосцепки опускается в нижнее положение, и рабочая его часть снова выходит в зев, а механизмы обеих автосцепок автоматически становятся в положение готовности к новому сцеплению.

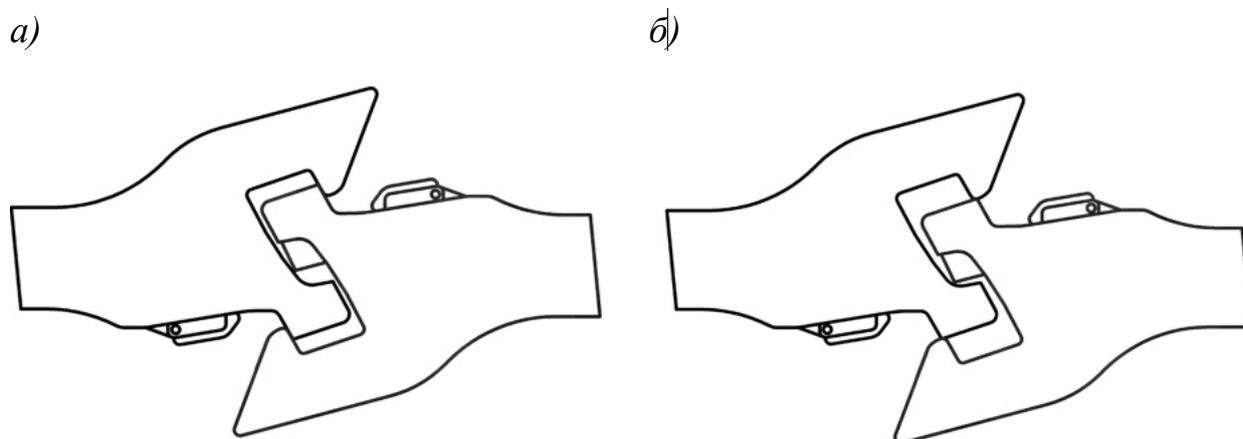


Рисунок 3.9 – Положение расцепленных автосцепок во время *фазы разведения*:
а – в середине фазы; *б* – в конце фазы

Установлено, что продолжительность третьей фазы является величиной случайной. Ее продолжительность в основном зависит от сил сопротивления в контуре зацепления смежных автосцепок, препятствующих их разъединению. Причем величины данных сил могут быть различными, а в ряде случаев достигать значений, при которых отделение отцепа от состава становится невозможным. В первую очередь это зависит от состояния тяговых и боковых поверхностей малого и больших зубьев взаимодействующих автосцепок, а также их износа.

При моделировании третьей фазы состояние малого и больших зубьев целесообразно описывать с использованием коэффициента трения, который для сухих чистых поверхностей пар материалов «сталь по стали» составляет в среднем 0,2–0,3. Ранее производились исследования [70], которыми было установлено, что для грубых рабочих поверхностей контура зацепления автосцепок величина коэффициента может иметь значение 0,5 и более. Такие высокие величины объясняются наличием на тяговых поверхностях автосцепок ржавчины, внешних загрязнений, а также различных дефектов, таких как выкрашивание, задиры, наплывы и т. п.

При моделировании принято следующее. Во-первых, коэффициент трения μ – величина случайная, распределение которой подчиняется усеченному нормаль-

ному закону распределения¹. Во-вторых, значение нижней границы интервала множества коэффициентов трения принимается равным 0,2, а верхней границы равным 0,6². При этом параметры усеченного нормального закона распределения коэффициента трения будут следующими: средняя величина коэффициента $\bar{\mu}_\mu = 0,4$ [8], стандартное отклонение $\sigma_\mu = 0,06$, интервал $\mu \in [0,2; 0,6]$. В этом случае расчет случайной величины коэффициента трения μ производится по формуле:

$$\mu = \bar{\mu}_\mu + \sigma_\mu \cdot \left(\sum_{i=1}^{12} R_i - 6 \right), \quad (3.8)$$

где R_i – равномерно распределенное случайное число на интервале (0, 1).

Наблюдения показали, что процессы, происходящие в первой фазе, могут быть достаточно достоверно формализованы с использованием шарнирно-осевой модели скатывающихся отцепов. Однако дальнейшие фазы в моделях, используемых в настоящее время, не учитываются. В результате наблюдений выявлено, что продолжительность двух последних фаз может быть достаточно длительной (секунды, а в ряде случаев более 10 с). Этим и обуславливается разница расчетных координат точек отрыва скатываемых отцепов от фактических значений.

Также установлена зависимость сил сопротивления от площади зацепления (пятна контакта) взаимодействующих автосцепок. Этим обуславливаются лучшие условия разъединения автосцепок на горбах горок, имеющих малый радиус вертикальной кривой со стороны спускной части.

Предлагаемый блок моделирования процесса разъединения автосцепок при отделении отцепов от состава, состоящий из трех фаз, может быть использован для совершенствования уже созданных имитационных моделей скатывания отцепов с сортировочных горок (например [63], приложение Г) или при создании новых. Его использование позволяет учитывать влияние скорости роспуска и состояния автосцепок вагонов на положение отцепов в момент их отрыва от состава.

¹ Коэффициент трения тяговых поверхностей зубьев автосцепки, в свою очередь, зависит от многих факторов, таких как: температура окружающей среды и корпуса автосцепки, влажность воздуха, выпадение осадков, наличие коррозии или внешних загрязнителей.

² При величине коэффициента трения выше 0,58 и номинальных размерах контура зацепления автосцепок [26] в процессе отделения отцепов тяговые поверхности автосцепок «схватываются» и разъединение становится невозможным при любых продольных силах.

3.4.2 Уточнение методики расчета сортировочных горок в части определения точек отрыва отцепов от состава

В настоящее время в существующей теории расчета горок при определении положения точки отрыва учитывается только первая фаза, чего, как показали выполненные исследования, недостаточно. Представляется целесообразным при имитационном моделировании скатывания отцепов для определения параметров головного участка горки, начальных интервалов между отцепами и расчетной скорости роспуска ввести в методику расчета и учитывать дополнительный вид сопротивления движению отцепа – *удельное сопротивление при разъединении автосцепок вагонов* w_a . Указанное сопротивление движению необходимо учитывать как одно из слагаемых в составе суммарного удельного сопротивления движению отцепа до момента фактического отрыва отцепа от состава [98, 100].

Удельное сопротивление при разъединении автосцепок вагонов – случайная величина, зависящая от множества факторов: скорости роспуска, температуры окружающей среды и влажности воздуха, характеристик разделяемых отцепов и др. В результате этого, формализация процессов, происходящих при разведении автосцепок, достаточно сложна, в настоящее время полностью не проработана и требует дополнительных исследований. Расчетные значения величин *удельного сопротивления при разъединении автосцепок вагонов* можно определять на основании данных, полученных эмпирическим путем на эксплуатируемых сортировочных горках [101].

По результатам натурных наблюдений предлагается при имитационном моделировании скатывания отцепов расчет случайной величины w_a выполнять по формуле, соответствующей смещенному экспоненциальному закону распределения, Н/кН [69, 98, 101]:

$$w_a = -(\bar{w}_a - w_a^{\text{мин}}) \ln(R) + w_a^{\text{мин}}, \quad (3.9)$$

где $w_a^{\text{мин}}$ и \bar{w}_a – минимальное и среднее значения удельного сопротивления движению отцепа при разъединении автосцепок (можно принять, соответственно, 2 и 6 Н/кН);

R – случайная величина, равномерно распределенная в интервале $(0; 1)$.

В аналитических расчетах, величину *удельного сопротивления при разъединении автосцепок вагонов* в зависимости от решаемых задач следует принимать, как среднее или как экстремальные значения. Суммарное удельное сопротивление движению одиночного отцепа для среднестатистического отцепа, а также для расчетных бегунов ОП (П) и ОХ (Х) будет определяться, соответственно, по формулам:

$$\sum \bar{w} = \bar{w}_o + \bar{w}_{св} + \bar{w}_{ск} + \bar{w}_a, \quad (3.10)$$

$$\sum w^{ОП} = w_o^{ОП} + w_{св}^{ОП} + w_{ск}^{ОП} + w_a^{макс}, \quad (3.12)$$

$$\sum w^{ОХ} = w_o^{ОХ} + w_{св}^{ОХ} + w_{ск}^{ОХ} + w_a^{мин}, \quad (3.11)$$

Где w_o , $w_{св}$, $w_{ск}$ – удельные сопротивления движению бегуна, соответственно, основное, от воздушной среды и ветра, от стрелочных переводов и кривых;

\bar{w} – среднее значение удельного сопротивления движению, Н/кН;

$w_a^{макс}$ – значение *удельного сопротивления движению отцепа при разъединении автосцепок*, соответствующее средним неблагоприятным условиям расцепа (можно принять равным 10 Н/кН).

3.4.3 Моделирование ветрового воздействия

Одной из причин расхождения расчетных и фактических координат точек отрыва отцепов от состава является упрощенное представление воздействия на скатывающиеся отцепы воздушной среды и ветра [89]. Это связано с тем, что в используемых справочниках по климату ветер характеризуют обычно средней скоростью и направлением, осредненными за некоторый интервал времени, который, как правило, составляет 10 мин [106, 115]. Поэтому при проведении горочных расчетов скорость и направление ветра с момента прохода отцепом горба горки и до момента его остановки в сортировочном парке принимаются, как правило, постоянными. Причем данные значения считаются неизменными в процессе расформирования всего состава.

Однако ветер в редких случаях бывает ровным даже в незначительных временных интервалах. Обычно наблюдаются его порывы, вызванные торможением частиц воздуха о поверхность земли, конвекционными токами между различно нагретыми слоями воздуха, трением между слоями, движущимися с различными скоростями и т. д. Это приводит к тому, что мгновенные значения скорости и направления ветра в каждой точке пространства быстро изменяются во времени, и движение воздуха в определенной точке потока складывается из отдельных кратковременных порывов и толчков с резким и внезапным изменением скоростей и направлений, следующих непрерывно один за другим (рисунок 3.10). Такие колебания скоростей и направлений при движении воздуха в метеорологии называют *порывистостью ветра*. Ее причиной является турбулентность, которая особенно велика у поверхности земли [106, 115].

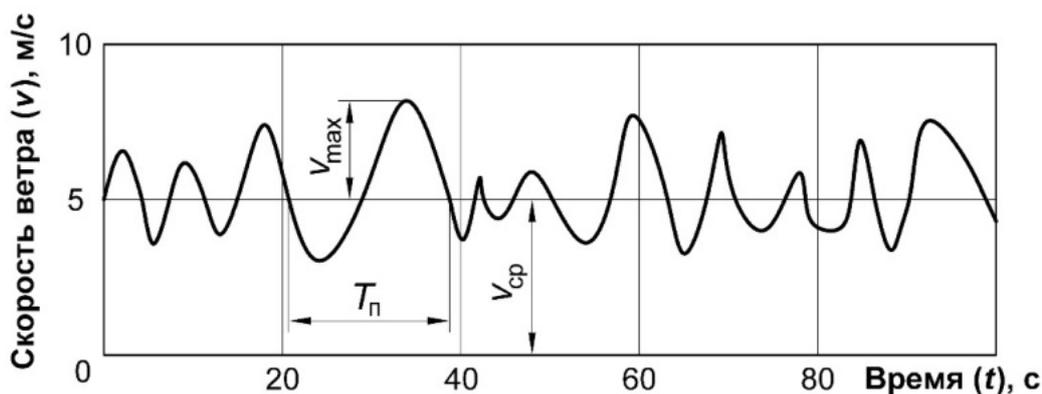


Рисунок 3.10 – График изменения скорости порывистого ветра¹

Основными параметрами ветра, характеризующими его изменчивость, являются коэффициент порывистости и период пульсаций. Коэффициент порывистости K_p определяется отношением наибольшей скорости в порыве v_{max} к средней скорости ветра v_{cp} за интервал времени [115]:

$$K_p = v_{max} / v_{cp}. \quad (3.13)$$

Известно, что коэффициент порывистости – величина случайная, которая зависит от особенностей местности в районе расположения станции, а также ряда других факторов и в целом убывает с увеличением средней скорости ветра. Рядом исследований [104, 105, 115] была определена устойчивая зависимость макси-

¹ Для исключения мелких пульсаций кривая скорости ветра сглажена.

мальной скорости ветра в порыве от средней скорости ветра, характерная для большинства типов местности.

Период пульсаций ветра $T_{п}$ также является величиной случайной, зависящей от множества факторов и внешних условий, однако известно, что он может составлять от нескольких минут при большой величине средней скорости ветра и до одной секунды при малой.

В процессе расформирования состава интервалы времени между моментами отрыва соседних одновагонных отцепов, как правило, не превышают 10-20 с и могут снижаться в ряде случаев до 5 с. Так как интервалы времени между отцепами сопоставимы с периодами пульсаций ветра, воздействие ветра на отцепы, следующие друг за другом, может быть различным. Это будет влиять на положение координат точек отрыва отцепов на горбе горки. Таким образом, для более точного определения расчетной скорости роспуска, а также расчета ряда параметров перевальной и спускной частей горок, особенно при использовании метода имитационного моделирования, представляется целесообразным рассматривать воздействие ветра на отцепы в виде случайного процесса [89].

Для более адекватной оценки ветрового воздействия на отрыв отцепов от состава при имитационном моделировании предлагается рассматривать следующие основные параметры воздушной среды и ветра: направление ветра, среднюю скорость ветра $v_{ср}$, максимальную скорость ветра в порыве v_{max} , мгновенную скорость ветра v , а также продолжительность порывов, т. е. период пульсаций ветра $T_{п}$.

В качестве случайных параметров ветрового воздействия, изменяющихся во времени, следует рассматривать амплитуду и период пульсации скорости ветра, которые, в свою очередь, зависят от средней скорости, принимаемой постоянной на период моделирования. Отклонение направления ветра от осредненного, как правило, не превышает нескольких градусов, поэтому при моделировании направление ветра следует принимать неизменным на всем протяжении расформирования одного состава.

Для моделирования воздействия ветра на скатывающиеся отцепы предлагается рассматривать мгновенную скорость ветра $v(t)$ как сумму средней скорости ветра v_{cp} , осредненной за десятиминутный интервал времени, и переменной (пульсационной) составляющей скорости ветра $\Delta v_{п}(t)$:

$$v(t) = v_{cp} + \Delta v_{п}(t). \quad (3.14)$$

Пульсационную составляющую скорости ветра $v_{п}(t)$ целесообразно представлять в виде канонического разложения случайной функции, [104, 105]:

$$\Delta v(t) = \sum_{i=1}^n k_i \eta_i(t), \quad (3.15)$$

где n – число рассматриваемых пульсаций ветра;

k_i – коэффициенты разложения, случайные величины;

$\eta_i(t)$ – координатные функции, например, тригонометрические.

Характер изменения указанной величины во времени можно представить графиками тригонометрических функций – синусоидами со случайными амплитудами пульсаций, определяемыми коэффициентами порывистости и случайной продолжительностью порывов (пульсаций). В этом случае выражение (3.14) примет вид [104, 105]:

$$v(t) = v_{cp} \left[1 + \sum_{i=1}^n (K_{\Pi i} - 1) \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T_{\Pi i}} t \right) \right], \quad (3.16)$$

где $K_{\Pi i}$ и $T_{\Pi i}$ – случайные статистические зависимые величины коэффициента пульсаций и периода пульсаций ветра для i -ой пульсации ветра соответственно.

Рядом ученых [104, 105, 106, 115], была установлена статистическая зависимость между средними скоростями ветра, коэффициентами порывистости и продолжительностью порывов ветра. Например, в работах [104, 105] были установлены следующие характеристики порывов ветра, распределение которых близко к нормальному: коэффициент порывистости $K_{п}$ лежит в пределах [1,05; 1,45], имеет математическое ожидание, равное 1,25, и стандартное отклонение, равное 0,067, а период пульсаций $T_{п}$ находится в диапазоне [5; 45] с математическим ожиданием 25 с. Для конкретной местности параметры распределений

$T_{п}$ и $K_{п}$ могут быть получены в результате статистической обработки данных о ветре.

По данному методу произведен расчет координат положений одновагонных отцепов в момент их отрыва от состава. Получены данные о возможном рассеивании координат точек отрыва отцепов в зависимости от осредненной (средней) скорости ветра за десятиминутный интервал, которые были сопоставлены с результатами, получаемыми «классическим» путем, т. е. без учета колебаний скорости ветра во времени (рисунок 3.11.).

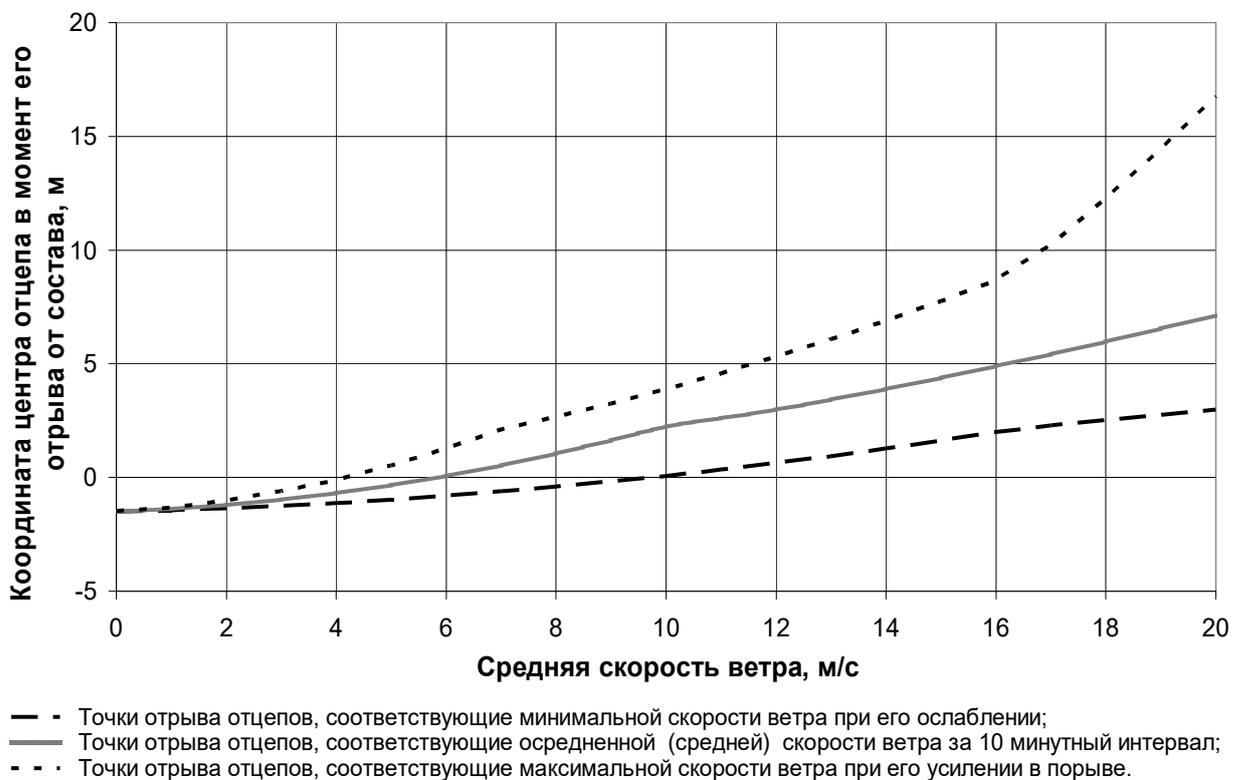


Рисунок 3.11 – Область рассеивания координат точек отрыва отцепов от состава¹ с учетом стохастических пульсаций скорости ветра

В результате можно сделать следующие выводы:

1. Случайный характер воздействия воздушного потока на вагоны оказывает существенное влияние на рассеивание координат точек отрыва.

¹ Моделирование производилось при нижеперечисленных условиях. Перевальная часть горки имеет следующие параметры: $i_n = 8 \%$, $i_c = 47 \%$, $R_n = 350$ м, $R_c = 300$ м. Отцеп имеет следующие параметры: одиночный крытый вагон, масса – 22 т, основное удельное сопротивление движению – 1,75 Н/кН. Параметры роспуска: скорость роспуска – 1,7 м/с, температура окружающей среды – 0 °С, угол обдувания на горбе горки – 25 град.

2. Область рассеивания координат точек отрыва отцепов в результате воздействия ветра увеличивается с ростом его средней скорости, достигая при экстремальных скоростях ветра 15 м и более.

3. Учет фактора случайного воздействия ветра на последовательно скатываемые отцепы вызывает снижение расчетной скорости роспуска состава, получаемой без учета этого фактора. При этом чем выше средняя скорость ветра, тем значительнее становится снижение скорости роспуска.

4. При определении расстояния до первого разделительного элемента целесообразно выполнять проверочный расчет для определения степени влияния пульсаций ветра на расчетную скорость роспуска составов. При проектировании следует отдать предпочтение варианту конструкции, обеспечивающему большее значение скорости роспуска.

В целом можно сделать вывод, что учет фактора случайного ветрового воздействия на отцепы может позволить с большей достоверностью и точностью производить определение ряда параметров перевальной и спускной частей сортировочных горок.

Выводы по третьей главе

По результатам выполненных исследований, представленных в третьей главе, сделаны следующие выводы:

1. Разработана методика проведения и выполнены натурные наблюдения за процессом отрыва отцепов от состава на перевальной части сортировочных горок. Выявлены основные факторы, влияющие на отрыв отцепов от состава при роспуске. Установлено, что существующие методики имеют погрешность при определении положения отрыва отцепов от состава, так как в них не учитываются в полной мере силовые взаимодействия расцепленных перед горбом горки автоцепов в процессе их разведения. В результате запаздывание отделения отцепов в реальных условиях приводит в ряде случаев к вынужденному снижению скорости роспуска ниже расчетной.

2. Для учета фактора запаздывания отрыва отцепов из-за влияния автосцепок разработана математическая модель отделения отцепов от состава, учитывающая процесс разъединения автосцепок. Данный процесс рассматривается в виде трех последовательных фаз: фазы перехода автосцепок из сжатого состояния в равновесное, фазы растягивания автосцепок и выработки зазоров, фазы разведения автосцепок. Использование этой модели позволяет оценивать влияние на положение отцепов в момент их отрыва от состава ряда факторов, в частности: скорости роспуска, сопротивления движению отцепов, состояния автосцепок вагонов.

3. Разработана методика учета в горочных расчетах нового дополнительно вида удельного сопротивления движению отцепа *при разъединении автосцепок вагонов* w_a . Указанное сопротивление следует учитывать до момента фактического отрыва отцепа от состава. Это случайная величина, зависящая от множества факторов, таких как температура окружающей среды, влажность воздуха, наличие осадков, скорость роспуска, тип и состояние автосцепок вагонов и ряда других.

4. Установлено, что одной из причин расхождения расчетных и фактических координат точек отрыва отцепов от состава является упрощенное представление воздействия воздушной среды и ветра на скатывающиеся отцепы. Для учета данного фактора разработана методика моделирования ветровых нагрузок на вагоны при роспуске, учитывающая случайный характер воздействия воздушного потока на отцепы.

Таким образом, результаты исследований данной главы могут быть использованы для совершенствования теории горочных расчетов в части уточнения положения отцепов при их отрыве от состава, а также использоваться в интеллектуальных подсистемах прогнозирования скатывания отцепов с горки в составе систем автоматизации управления горочными процессами.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОДА СЦЕПЛЕННЫХ ВАГОНОВ ПО ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

4.1 Общие положения

При прохождении вагонов через горб горки их сцепленные автосцепки смещаются по высоте относительно друг друга. Величина этого смещения зависит от продольного профиля горки и линейных размеров вагонов. Профиль горба горки должен обеспечивать возможность прохода всех типов вагонов, разрешенных к роспуску с горки, в сцепленном состоянии без повреждения автосцепного устройства или конструкции вагона, а также при минимальной вероятности их самопроизвольного расцепления.

Ранее исследовался проход сцепленных вагонов разных конструкций через горб горки при различных параметрах его продольного профиля. Основным показателем, характеризующим проход вагонов без саморасцепа и сверхнормативных нагрузок на узлы вагона, является величина дополнительного вертикального смещения центров взаимодействующих автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$. Максимальная его величина не должна превышать значения [29, 36, 84, 97, 127]:

$$\Delta h_{\text{геом}} \leq \Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{\text{нач}}, \quad (4.1)$$

где $\Delta h_{\text{доп}}$ – допускаемое по конструкции автосцепок вертикальное смещение их осей, при котором обеспечивается движение вагонов без саморасцепа, мм;

$\Delta h_{\text{нач}}$ – возможная в соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог РФ [111] начальная разность уровней автосцепок, мм.

Оценка проходимости¹ сцепленных вагонов через горб горки производится сравнением величины $\Delta h_{\text{геом}}$ с допускаемым значением. При превышении этой величины делается вывод о целесообразности изменения конструкции продольного профиля перевальной части горки с целью смягчения условий прохода вагонов в сцепленном состоянии через горб. А при исследовании возможности прохода через горб горки вновь проектируемых вагонов может ставиться вопрос об установке модернизированных автосцепок либо об изменении конструктивных параметров вагона.

¹ Проходимость подвижного состава через горб горки – обеспечение прохождения сцепленных единиц железнодорожного подвижного состава через горб сортировочной горки без саморасцепа и повреждения их деталей.

В ряде исследований устанавливались разные значения $\Delta h_{\text{доп}}$, что приводило к получению различных выводов о рациональной конструкции перевальных частей горок. Например, в исследованиях [127] расчетное значение этой величины принималось на уровне 180 мм с учетом данных об эксплуатации на горках вагонного парка, при этом допускалось возникновение саморасцепа, но только как достаточно редкого явления. А в исследованиях [24, 36, 70] устанавливается значение величины $\Delta h_{\text{доп}}$, равное 160–165 мм, которое практически полностью исключает возможность появления самопроизвольного расцепления вагонов при исправных автосцепках.

Кроме возможности появления саморасцепа, прохождение сцепленных вагонов через гребень сортировочной горки может сопровождаться силовым взаимодействием через автосцепки, защемленные в контурах зацепления или ограничителями вертикальных перемещений, с передачей при этом вертикальных нагрузок, в некоторых случаях превышающих допустимый уровень по прочности деталей. Помимо эксплуатационных затруднений, связанных с необходимостью устранения явно выраженных повреждений, рассматриваемое явление ведет к общему снижению прочности и надежности деталей узла автосцепки с возможными аварийными последствиями в связи с обрывами и саморасцепами поездов. Появление сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов при их прохождении в сцепленном состоянии гребень горки носит также вероятностный характер и зависит от ряда факторов, в том числе от $\Delta h_{\text{геом}}$ [70, 145].

С учетом вышеизложенного представляется целесообразным разработку имитационной модели прохождения сцепленными вагонами перевальной части горки, позволяющей оценивать вероятности прохода различных моделей вагонов гребень горки без саморасцепа и сверхнормативных нагрузок на их узлы. Это позволит принимать более обоснованные решения при проектировании и эксплуатации гребней сортировочных горок. По результатам проведения теоретических исследований было установлено, что процедуру расчета искомых вероятностей следует разделить на две отдельные задачи:

1) определение максимальных значений дополнительного вертикального смещения осей автосцепок смежных вагонов при проходе горба горки;

2) расчет вероятностей самопроизвольного расцепления и сверхнормативного нагружения узлов вагонов по полученным в первой задаче экстремумам.

Учитывая сложность и трудоемкость решения данных задач аналитическими методами, разработана имитационная модель для определения показателей прохода сцепленных вагонов через горб горки с целью:

– сравнения различных вариантов продольного профиля перевальной части сортировочной горки;

– анализа соответствия фактического и проектного очертаний продольного профиля перевальной части горки.

4.2 Разработка имитационной модели прохождения сцепленными вагонами перевальной части сортировочной горки

4.2.1 Определение максимальных значений дополнительного вертикального смещения осей автосцепок смежных вагонов при проходе горба горки

Имитационное моделирование прохождения сцепленных вагонов по перевальной части сортировочной горки производится следующим образом [97].

На первом этапе формируется массив данных о продольном профиле горба горки. По заданным геометрическим параметрам профиля (величинам уклонов, длинам элементов, радиусам вертикальных кривых) на ЭВМ производится последовательная генерация координат (x, y) с шагом Δx , обеспечивающим заданную точность исследований. При исследовании продольных профилей эксплуатируемых горок в массив данных вводятся значения, полученные в результате инструментальной съемки.

На втором этапе моделируется последовательное перемещение сцепленных вагонов по горбу горки с выбранным шагом Δx . Значения параметров вагонов могут быть заданы или сформированы автоматически программным блоком моделирования отцепопотока, который основывается на данных о структуре перера-

батываемого вагонотока на конкретной горке. Расчетная схема прохождения сцепленных вагонов по горбу горки представлена на рисунке 4.1.



Условные обозначения:

R_n, R_c – радиусы вертикальной кривой соответственно со стороны надвижной и спускной частей, м; i_n – крутизна противоуклона, ‰; i_c – уклон первого скоростного элемента, ‰; $\Delta h_{\text{геом}}$ – относительное вертикальное смещение осей автосцепок смежных вагонов, м; $x_{\text{сц}}$ – общая координата сцепа, соответствующая удалению центра сцепленных автосцепок от начала координат, м

Рисунок 4.1 – Расчетная схема прохождения сцепленных вагонов по горбу горки

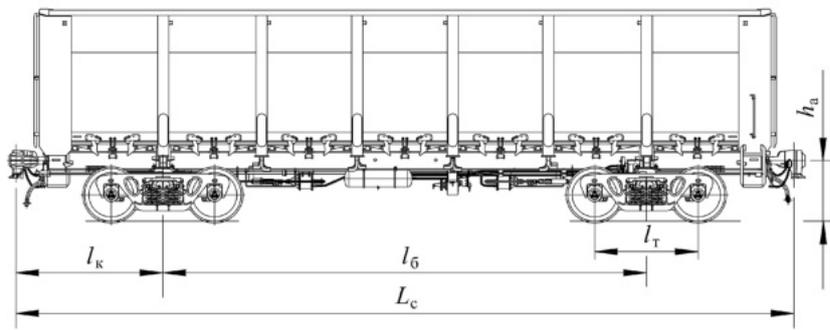
Для каждого положения отцепы относительно координаты оси зацепления автосцепок $x_{\text{сц}}$ определяются координаты (x_i, y_i) точек касания головок рельсов всех колесных пар смежных сцепленных вагонов. Далее по координатам точек касания и расчетным параметрам вагонов рассчитываются ординаты центра зацепления автосцепок (точки пересечения продольной оси автосцепки с осью сцепления) у каждого вагона (y_{a1} и y_{a2}). Расчетные геометрические параметры вагона для вычисления ординат представлены на рисунке 4.2.

Относительное вертикальное смещение осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ определяется как разность ординат центров зацепления смежных автосцепок:

$$\Delta h_{\text{геом}} = y_{a1} - y_{a2}. \quad (4.2)$$

При расчете величины $\Delta h_{\text{геом}}$ принимается, что при расположении сцепленных вагонов на горизонтальном участке пути разница по высоте между продольными осями их автосцепок равна нулю. В результате этого величина $\Delta h_{\text{геом}}$ харак-

теризует только дополнительное вертикальное смещение осей автосцепок, вызванное проходом сцепа вагонов через горб горки.



Условные обозначения:

- l_k – длина консоли вагона до оси сцепления, м;
- $l_б$ – база вагона, м;
- $l_т$ – база тележки вагона, м;
- L_c – длина вагона по осям сцепления автосцепок, м;
- h_a – высота оси автосцепки над уровнем верха головок рельсов, м

Рисунок 4.2 – Расчетные геометрические параметры вагона

При моделировании определяется зависимость величины $\Delta h_{\text{геом}}$ от $x_{\text{сц}}$. Характер зависимости в процессе прохода сцепа по всему участку перевальной части неоднократно меняется в связи с изменениями закона движения какой-либо из восьми точек (контактов «колесо – рельс» колесных пар смежных вагонов) при переходе одной из точек на соседний элемент профиля. Пример результата моделирования на ЭВМ величины $\Delta h_{\text{геом}}$ при проходе сцепа вагонов по перевальной части «идеальной» (профиль которой соответствует проекту) горки, а также эксплуатируемой горки представлен на рисунке 4.3.

Как видно из рисунка 4.3 прохождение сцепленными вагонами по перевальной части эксплуатируемых горок характеризуется большими неравномерностями и амплитудами колебаниями автосцепок смежных вагонов. В эксплуатации при неблагоприятных условиях (при наличии сверхнормативных искажений профиля) это вызывает увеличение риска появления саморасцепа или сверхнормативных нагрузок на узлы проходящих через горб горки вагонов.

Выполнены исследования зависимости $\Delta h_{\text{геом}}$ от $x_{\text{сц}}$ применительно к типовым нормативным профилям перевальной части горки, а также реальному продольному профилю горбов эксплуатируемых сортировочных горок. Установлено, что зависимость $\Delta h_{\text{геом}}$ от $x_{\text{сц}}$ имеет две экстремальные точки, имеющих разные знаки (см. рисунок 4.3). Именно этими максимальными значениями $\Delta h_{\text{геом}}$ определяется проходимость отцепы по горбу горки без саморасцепа.

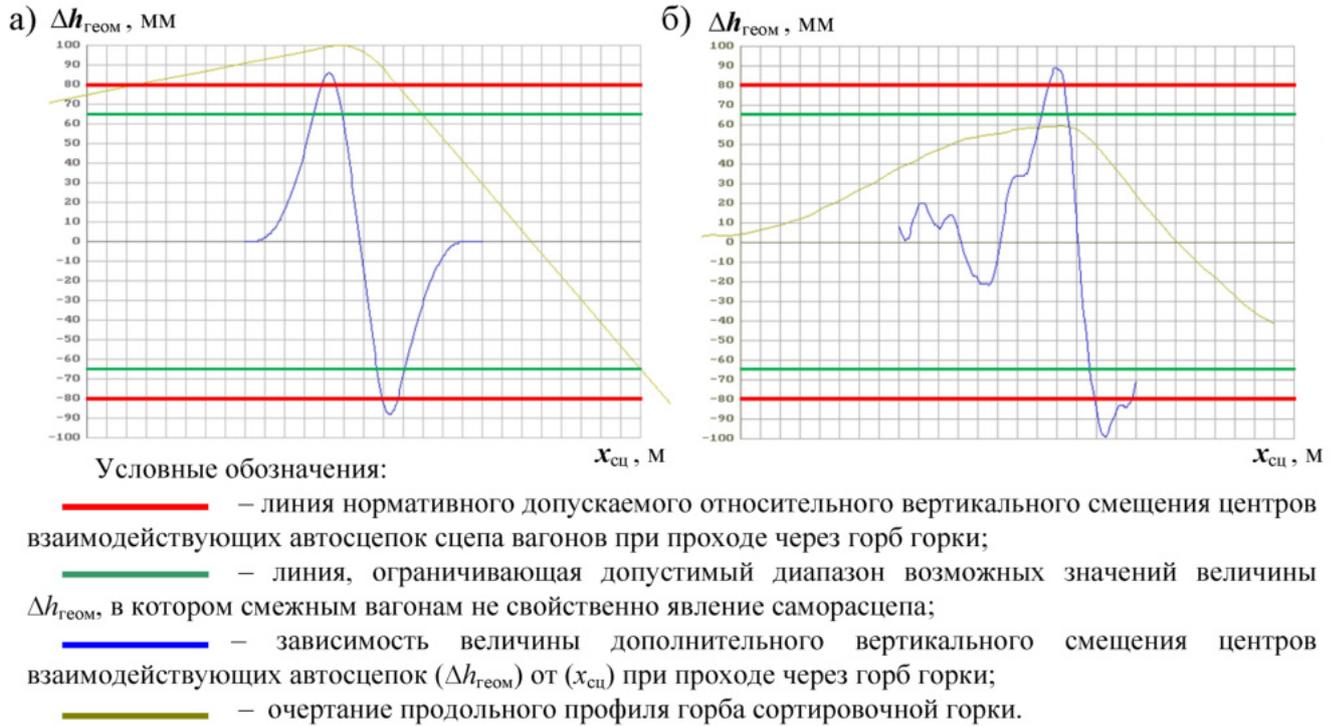


Рисунок 4.3 – Зависимость величины дополнительного вертикального смещения осей автосцепок ($\Delta h_{\text{геом}}$) от координаты $x_{\text{сц}}$ при проходе сцепленных длиннобазных платформ:

а – по горбу «идеальной» горки ($R_c = 250$ м, $R_n = 350$ м, $i_n = 8$ ‰, $i_c = 47$ ‰);

б – горбу эксплуатируемой горки «Ч»

Максимальные значения $\Delta h_{\text{геом}}$ располагаются в зонах, примыкающих к точкам сопряжения прямых и смежных с ними радиусных элементов профиля горба горки. Положительный максимум расположен со стороны надвигной части, а отрицательный – со стороны спускной части (положительное значение относительного вертикального смещения осей автосцепок соответствует положению, в котором центр зацепления автосцепки впереди идущего вагона расположен выше центра зацепления автосцепки позади идущего вагона сцепа). Причем отрицательный максимум вертикального смещения по модулю, как правило, больше положительного, за счет меньшего радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части.

Таким образом, по результатам моделирования прохода сцепа вагонов по горбу горки определяются максимальное $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и минимальное $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ значения дополнительного вертикального смещения осей автосцепок, которые служат основными входными данными для решения второй задачи.

4.2.2 Расчет вероятности самопроизвольного расцепления вагонов при прохождении сцепленных вагонов по перевальной части сортировочной горки

Известно, что саморасцепы возникают в случае превышения относительно-го вертикального смещения осей автосцепок Δh над допусковым смещением осей автосцепок $\Delta h_{\text{доп}}$, т.е. при выполнении условия:

$$\Delta h > \Delta h_{\text{доп}}. \quad (4.3)$$

Величина $\Delta h_{\text{доп}}$ зависит от конструктивных данных взаимодействующих автосцепок и их износа. Исследованиями ЦНИИ МПС [127] установлено, что для типовой автосцепки СА-3 (при оценке проходимости по переломам профиля вагона с нетиповой автосцепкой должны учитываться конструктивные данные этой сцепки) величина $\Delta h_{\text{доп}}$ зависит от зазора S (см. рисунок 3.8) в контуре зацепления. Зависимость величины $\Delta h_{\text{доп}}$ от S приведена в работе [127] и представлена на рисунке 4.4.

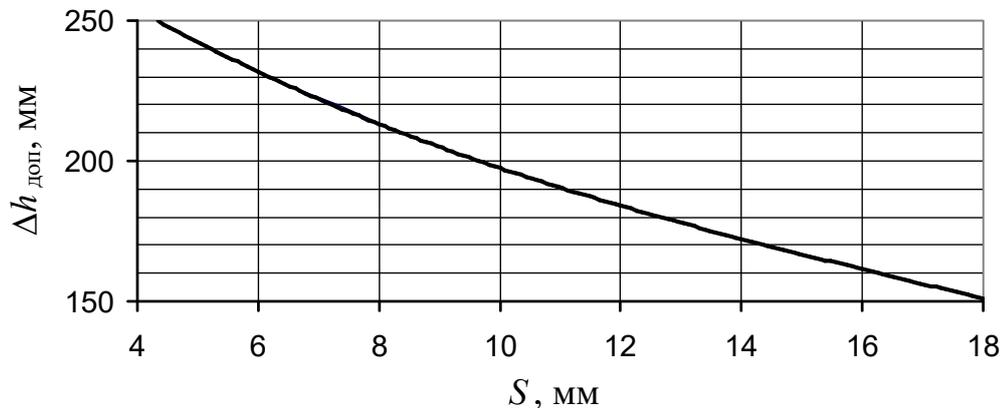


Рисунок 4.4 – График зависимости величины $\Delta h_{\text{доп}}$ от зазора S для типовой автосцепки СА-3

Зависимость показывает, что при износе контура зацепления и увеличении зазора S , величина $\Delta h_{\text{доп}}$ уменьшается и вероятность саморасцепа возрастает. Размер зазора S – величина случайная, она распределена по усеченному нормальному закону с параметрами $M[S] = 11,92$ мм и $\sigma_s = 1,88$ мм [44, 127]. Зазор S у новых автосцепок может быть равен 4 мм [28], что соответствует $\Delta h_{\text{доп}} = 250$ мм, а для изношенных, но еще отвечающих нормам эксплуатации автосцепок, около 18 мм ($M[S] + 3\sigma_s$), что соответствует $\Delta h_{\text{доп}} = 150$ мм.

Очевидно, что величина $\Delta h_{\text{доп}}$ также является случайной и распределена по усеченному закону, который близок к нормальному и имеет некоторую асимметрию. Для упрощения расчетов допустима замена данного распределения усеченным нормальным распределением, имеющим параметры $M[\Delta h_{\text{доп}}] \approx 186$ мм и $\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}} \approx 11,6$ мм при границах интервала возможных значений 150–250 мм.

Относительное вертикальное смещение осей автосцепок Δh при проходе сцепа через горб горки складывается из следующих величин:

- $\Delta h_{\text{геом}}$, вызванного проходом сцепа вагонов через горб горки;
- начального вертикального смещения продольных осей автосцепок $\Delta h_{\text{нач}}$, образующегося при формировании состава;
- случайного вертикального смещения $\Delta h_{\text{случ}}$, обусловленного колебательными процессами при прохождении вагонов по реальному продольному профилю горба горки.

Для исследования величины $\Delta h_{\text{нач}}$ произведено обследование составов, находящихся в парке приема (в ожидании расформирования), а также составов в сортировочном парке (в ожидании повторной сортировки). Были проведены замеры разницы высот между продольными осями автосцепок у смежных вагонов. Статистическим анализом установлено, что величина $\Delta h_{\text{нач}}$ является случайной и может быть хорошо описана усеченным нормальным законом с границами от минус 100 мм до плюс 100 мм и математическим ожиданием, равным 0. Границы усечения установлены в соответствии с требованиями ПТЭ [111] к начальной разнице уровней осей автосцепок.

Величина $\Delta h_{\text{случ}}$ не имеет формализованного выражения. Для практических расчетов параметры $\Delta h_{\text{случ}}$ можно принять равным нулю, но фактически указанная величина может приводить к увеличению вероятности саморасцепки.

Параметры случайной величины Δh будут определяться по формулам:

$$M[\Delta h] = M[\Delta h_{\text{нач}}] + M[\Delta h_{\text{геом}}] + M[\Delta h_{\text{случ}}], \quad (4.4)$$

$$\sigma[\Delta h] = \sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{геом}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}, \quad (4.5)$$

где M – математические ожидания соответствующих величин, мм;

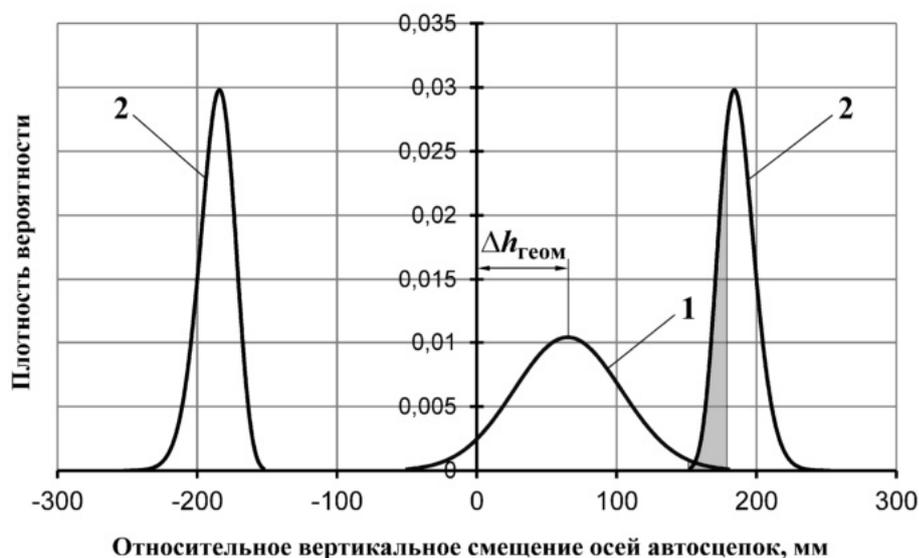
σ – стандартные отклонения величин, мм.

Переменная величина $\Delta h_{\text{геом}}$ принимается детерминированной, случайные величины $\Delta h_{\text{нач}}$ и $\Delta h_{\text{случ}}$ имеют математическое ожидание, равное нулю, следовательно, после преобразования формул (4.4) и (4.5) получим:

$$M[\Delta h] = \Delta h_{\text{геом}}, \quad (4.6)$$

$$\sigma[\Delta h] = \sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}. \quad (4.7)$$

Определение вероятности самопроизвольного расцепления вагонов P_c производится с помощью стохастической математической модели, представленной на рисунке 4.5, которая может быть сведена к известной в теории надежности модели типа «нагрузка – прочность» [7, 137]. При этом под «нагрузкой» понимается величина Δh , а под «прочностью» величина $\Delta h_{\text{доп}}$. В модели учтено, что величина $\Delta h_{\text{геом}}$ может принимать два экстремума: положительный $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$ (до вершины горки) и отрицательный $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$ (за вершиной горки). Поэтому в модели присутствует также и распределение величины $\Delta h_{\text{доп}}$ в области отрицательных значений.



Условные обозначения:

1 – плотность распределения величины фактического относительного вертикального смещения осей автосцепок Δh ;

2 – плотность распределения величины допускового относительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{доп}}$

Рисунок 4.5 – Стохастическая модель для определения вероятностей самопроизвольного расцепления вагонов при проходе горба горки

Композиция плотности распределения величины Δh и плотности распределения величины $\Delta h_{\text{доп}}$ позволяет получить еще одну случайную величину и ее

распределение – H (превышение фактического вертикального смещения осей автосцепок над допусаемым вертикальным смещением):

$$H = \Delta h_{\text{доп}} - \Delta h. \quad (4.8)$$

Очевидно, что самопроизвольное расцепление вагонов происходит при превышении величины Δh над $\Delta h_{\text{доп}}$. Отсюда, согласно модели (см. рисунок 4.5), вероятность саморасцепа вагонов P_c при заданном дополнительном вертикальном смещении осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ определяется по интегральной функции распределения вероятности случайной величины H :

$$P_c(H \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f(H) dH, \quad \text{при } \Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)} \text{ и } \Delta h_{\text{доп}} > 0, \quad (4.9)$$

$$P_c(H \geq 0) = \int_0^{\infty} f(H) dH, \quad \text{при } \Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)} \text{ и } \Delta h_{\text{доп}} < 0, \quad (4.10)$$

где $f(H)$ – плотность распределения случайной величины H .

Итоговая вероятность самопроизвольного расцепления вагонов $\sum P_c$ при проходе перевальной части сортировочной горки определяется вероятностями наступления двух событий:

– саморасцепа автосцепок до вершины горки $P_{c1}^{(+)}$ при $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)} > 0$;

– саморасцепа автосцепок после прохождения вершины горки $P_{c2}^{(-)}$ при $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)} < 0$.

Величина $\sum P_c$ равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного наступления и определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \sum P_c &= P_{c1}^{(+)} + P_{c2}^{(-)} (1 - P_{c1}^{(+)}) = P_{c1}^{(+)} + P_{c2}^{(-)} - P_{c1}^{(+)} P_{c2}^{(-)} = \\ &= 1 - (1 - P_{c1}^{(+)}) (1 - P_{c2}^{(-)}) = 1 - \left(1 - \int_{-\infty}^0 f(H_1) dH_1\right) \left(1 - \int_0^{\infty} f(H_2) dH_2\right), \end{aligned} \quad (4.11)$$

где $f(H_1)$ – плотность распределения случайной величины H_1 при величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)} > 0$ и $\Delta h_{\text{доп}} > 0$;

$f(H_2)$ – плотность распределения случайной величины H_2 при величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)} < 0$ и $\Delta h_{\text{доп}} < 0$.

При замене усеченных нормальных распределений случайных величин $\Delta h_{\text{доп}}$, $\Delta h_{\text{случ}}$ и $\Delta h_{\text{нач}}$ нормальным распределением представляется возможным использовать известную в теории надежности формулу для величины вероятности отказа в модели «нагрузка – прочность» [7]. Тогда решение выражений (4.9) и (4.10) значительно упростится и примет вид:

$$P_c = 0,5 - \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - M[\Delta h]}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right), \quad (4.12)$$

где $\Phi(x)$ – нормированная функция Лапласа, $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{u^2}{2}} du$.

После подстановки выражений (4.12) в формулу (4.11) и преобразования, получим следующее:

$$\sum P_c = 1 - \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - \Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) \right) \cdot \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - |\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}|}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{случ}}}^2}} \right) \right). \quad (4.13)$$

Для практических расчетов можно принять случайную величину $\Delta h_{\text{случ}}$ равной нулю. В настоящее время все вагоны грузового парка при капитальном ремонте должны оснащаться ограничителями вертикальных перемещений автосцепок, поэтому формулу (4.13) следует записать в следующем виде:

$$\sum P_c^{\max} = (1 - \eta) \cdot \left[\begin{array}{l} 1 - \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - \Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2}} \right) \right) \times \\ \times \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - |\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}|}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2}} \right) \right) \end{array} \right], \quad (4.14)$$

где η – доля вагонов, оборудованных ограничителями вертикальных перемещений автосцепок.

Вероятность саморасцепа вагонов $\sum P_c^{\max}$, определяемую по формуле (4.14), следует считать *максимальной*¹, соответствующей наиболее неблагоприятным условиям. Эти условия характеризуются отсутствием значимых продольных уси-

¹ Для исправных автосцепок, отвечающих эксплуатационным требованиям.

лий, передаваемых через автосцепки, что приводит к уменьшению силы трения в автосцепках до значений, не препятствующих их взаимному вертикальному смещению. Также следует учитывать, что автосцепки не должны быть сжаты, так как при отсутствии зазора S между их ударными поверхностями саморасцеп практически невозможен. Возникновение такого сочетания неблагоприятных условий при роспуске реально, однако, как показали натурные наблюдения, носит достаточно кратковременный характер и в зонах экстремальных значений $\Delta h_{\text{геом}}$ маловероятно¹.

Как правило, в процессе движения сцепленных вагонов по горбу горки на смежные автосцепки действуют продольные силы, которые вызывают подъем головы одной из автосцепок за счет силы трения, передаваемой от другой взаимодействующей автосцепки. Подъем корпуса автосцепки уменьшает относительное смещение продольных осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ на величину $\Delta h_{\text{п}}$ и увеличивает угол их перелома. Подъем ограничен величиной зазора E в вертикальной плоскости между корпусом автосцепки и розеткой.

Зазор E в эксплуатации величина случайная, согласно стандарту [30] имеет нормативное значение 20 мм с допуском плюс 16 мм. Величина возможного подъема средней точки контура зацепления $\Delta h_{\text{п}}$ при зазоре E определяется аналитически из соотношения:

$$\Delta h_{\text{п}} = \frac{E \cdot l_a}{l_q}, \quad (4.15)$$

где l_a – длина корпуса автосцепки от центра шарнира хвостовика до оси зацепления, м, для автосцепки модели СА-3 по ГОСТ 32885–2014 $l_a = 0,87$ м;

l_q – расстояние от центра шарнира до точки упора верхней грани хвостовика автосцепки в верхнюю кромку окна розетки, м.

В соответствии с формулой (4.15) диапазон случайной величины возможного подъема головы автосцепки $\Delta h_{\text{п}}$ для допускаемых значений зазора E составит от 44 до 78 мм. В таком случае вероятность саморасцепа вагонов при проходе горба горки с учетом возможного подъема головы одной из автосцепок составит:

¹ Достижение максимального относительного смещения автосцепок возможно при наличии знакопеременного режима действия продольных сил, вызванного подергиванием маневрового локомотива, что может нарушить подъем одной из автосцепок и вызвать ее проскальзывание на всю величину расчетного значения $\Delta h_{\text{геом}}$.

$$\sum P_c^{\min} = (1 - \eta) \cdot \left[\begin{array}{l} 1 - \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - (\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)} - M[\Delta h_{\Pi}])}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\Pi}}^2}} \right) \right) \times \\ \times \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - (|\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}| - M[\Delta h_{\Pi}])}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\Pi}}^2}} \right) \right) \end{array} \right]. \quad (4.16)$$

Данная вероятность определяет минимальный уровень возникновения саморасцепа вагонов, оборудованных стандартными автосцепками типа СА-3, которые опираются на центрирующий прибор жесткого типа.

При проходе горба горки вагонами, оборудованными усиленной автосцепкой СА-3, которая опирается на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика, голова одной из взаимодействующих автосцепок за счет деформации пружин может опускаться на величину Δh_0 . Конструкция подпружинивающей опоры позволяет смещаться корпусу автосцепки в вертикальной плоскости до 40 мм, что допускает отклонение такой автосцепки до 6 град вниз. При этом полное заклинивание контуров зацепления сцепленных автосцепок исключается [51, 52]. Учитывая достаточно высокую жесткость упругого подвешивания такой автосцепки (≈ 315 кН/м), при проходе горба горки возможны периодические срывы автосцепок относительно друг друга в вертикальной плоскости.

Следовательно, вероятность саморасцепа таких вагонов, определяющая минимальный уровень, будет еще ниже, чем у вагонов, оборудованных стандартными автосцепками типа СА-3, опирающимися на центрирующий прибор жесткого типа. Оценка данной вероятности затруднительна в силу влияния множества дополнительных случайных факторов. Допуская, что в результате воздействия срывов автосцепок величина Δh_0 распределена нормально в диапазоне своих возможных значений от нуля до полного сжатия пружин, можно рассчитать вероятность саморасцепа:

$$\sum P_c^{\min} = (1 - \eta) \cdot \left[\begin{array}{l} 1 - \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - (\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)} - M[\Delta h_{\Pi}] - M[\Delta h_0])}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\Pi}}^2 + \sigma_{\Delta h_0}^2}} \right) \right) \times \\ \times \left(0,5 + \Phi \left(\frac{M[\Delta h_{\text{доп}}] - (|\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}| - M[\Delta h_{\Pi}] - M[\Delta h_0])}{\sqrt{\sigma_{\Delta h_{\text{доп}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}^2 + \sigma_{\Delta h_{\Pi}}^2 + \sigma_{\Delta h_0}^2}} \right) \right) \end{array} \right]. \quad (4.17)$$

Экспериментальные испытания, проводимые в исследованиях [51, 70] на реальных горках, подтвердили возможное снижение расчетного дополнительного смещения продольных осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ на величину $\Delta h_{\text{п}}$.

Рассчитанные по формулам (4.14), (4.15) и (4.17) вероятности саморасцепа вагонов могут использоваться для сравнения конструктивных параметров продольного профиля. Реальная вероятность саморасцепления вагонов при проходе горба горки находится в интервале от $\sum P_c^{\text{max}}$ до $\sum P_c^{\text{min}}$ и приближена к минимальной границе диапазона.

Зависимость вероятностей самопроизвольного расцепления вагонов от дополнительного вертикального смещения осей автосцепок для стандартной автосцепки СА-3 и автосцепки СА-3, опирающейся на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика, представлена на рисунке 4.6.

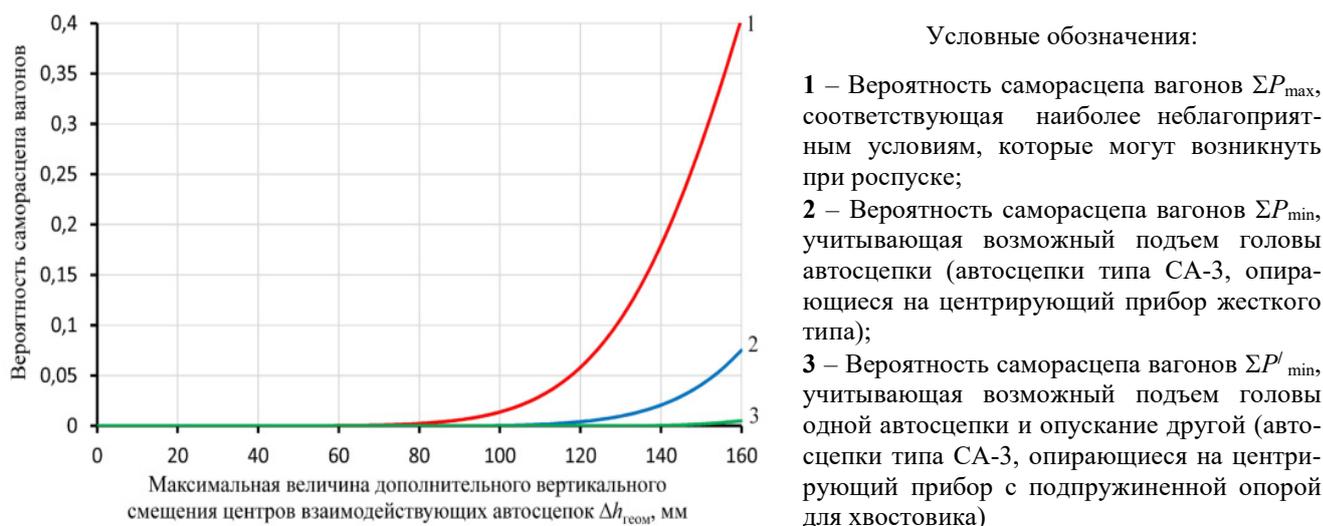


Рисунок 4.6 – Зависимость вероятности саморасцепа вагонов от экстремальных величин $\Delta h_{\text{геом}}$ при проходе горба горки ¹

Представленные зависимости показывают, что вероятности саморасцепа экспоненциально зависят от величины дополнительного вертикального смещения автосцепок. При нормативной величине $\Delta h_{\text{геом}}$ менее 80 мм вагонам не должно быть свойственно явление саморасцепа даже в неблагоприятных условиях, которые могут возникнуть при роспуске. А в обычных условиях эксплуатации вероят-

¹ При расчете вероятностей принято: все автосцепки без ограничителей вертикальных перемещений; экстремумы $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$ по модулю равны.

ность саморасцепа появляется при превышении величины $\Delta h_{\text{геом}}$ более 100 мм (для автосцепок типа СА-3, опирающихся на центрирующий прибор жесткого типа) и более 150 мм (для автосцепок типа СА-3, опирающихся на центрирующий прибор с подпружиненной опорой для хвостовика).

4.2.3 Расчет вероятности прохождения вагонов по перевальной части горки без появления сверхнормативных нагрузок на автосцепное устройство

Появление в процессе прохождения горба горки сверхнормативных вертикальных нагрузок, действующих на автосцепки, является одной из причин обрыва маятниковых подвесок, повреждения ограничителей вертикальных перемещений, изломов центрирующих балочек и изгибов хвостовиков автосцепок. Рассматриваемое явление, как правило, не вызывает немедленного их повреждения, а ведет к общему снижению прочности и надежности деталей узла автосцепки с возможными эксплуатационными затруднениями в будущем, вплоть до аварийных последствий в связи с обрывами и саморасцепами поездов.

В диссертационной работе для оценки продольного профиля перевальных частей горок с учетом вероятности появления сверхнормативных нагрузок на автосцепные устройства при проходе горба горки сделаны следующие допущения:

– показателем, характеризующим появление сверхнормативных нагрузок на автосцепное устройство, считается относительное вертикальное смещение осей автосцепок в результате прохождения вагонами горба горки $\Delta h_{\text{геом}}$;

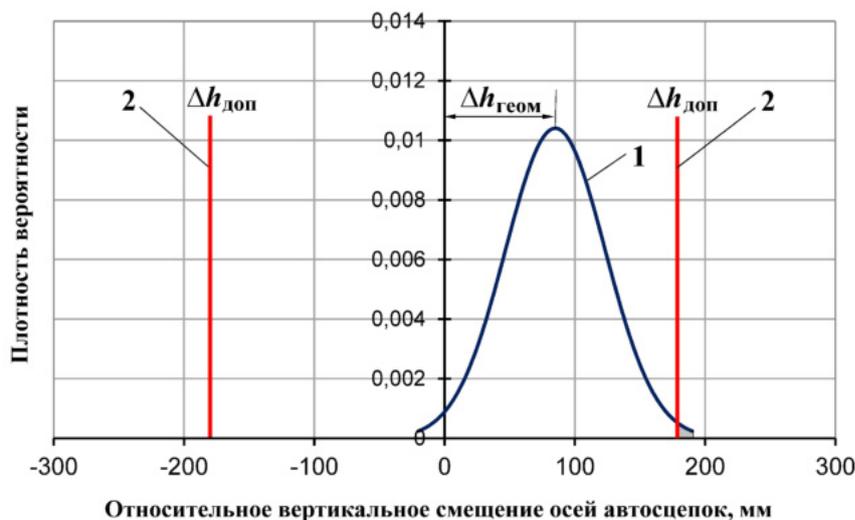
– силовые взаимодействия сцепленных автосцепок типа СА-3 при отсутствии ограничителей вертикальных перемещений не считаются сверхнормативными (допускается, что при проходе горба горки возможно свободное вертикальное проскальзывание голов автосцепок относительно друг друга на всю величину $\Delta h_{\text{геом}}$);

– силовые взаимодействия сцепленных автосцепок типа СА-3, имеющих ограничители вертикальных перемещений и опирающихся на центрирующий

прибор жесткого типа, при расчетной разности уровней их осей ($\Delta h_{\text{геом}} + \Delta h_{\text{нач}}$) свыше величины $\Delta h_{\text{доп}} = 180$ мм считаются сверхнормативными¹;

– силовые взаимодействия сцепленных автосцепок типа СА-3 и СА-3М, имеющих ограничители вертикальных перемещений и опирающихся на центрирующий прибор с упругой (подпружиненной) опорой для хвостовика, при расчетной разности уровней их осей ($\Delta h_{\text{геом}} + \Delta h_{\text{нач}}$) свыше величины $\Delta h_{\text{доп}} = 250$ мм считаются сверхнормативными (согласно ГОСТ 33211–2014 устанавливающего требования к прочности грузовых вагонов: « $\Delta S_{\text{доп}} = 0,25$ м при использовании на обоих вагонах центрирующего прибора с упругой опорой хвостовика автосцепки и наличия кронштейна (ограничителя вертикальных перемещений)» [29, с.40]²).

Определение вероятности появления сверхнормативных вертикальных нагрузок на автосцепки вагонов P_n производится с помощью стохастической математической модели, представленной на рисунке 4.7.



Условные обозначения:

1 – плотность распределения величины фактического относительного вертикального смещения осей автосцепок Δh ;

2 – уровень допускаемого относительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{доп}}$

Рисунок 4.7 – Стохастическая модель для определения вероятности сверхнормативных вертикальных нагрузок на автосцепки вагонов

¹ При достижении значения вертикального смещения осей автосцепок 140 мм происходит их заклинивание ограничителями вертикальных перемещений, что вызывает подъем головы одной из автосцепок. При этом возможен подъем головы на величину Δh_n , ограниченную вертикальными размерами окна розетки, допускающими отклонение автосцепки на 3 град вверх [31]. Дальнейший подъем уже невозможен. В результате этого хвостовик автосцепки одного из вагонов упирается через тяговый хомут в перекрытие хребтовой балки и начинает поднимать вагон. Это может приводить к изгибу хвостовика или изломам маятниковых подвесок смежной автосцепки [32].

² Конструкция подпружинивающей опоры позволяет опускаться хвостовику автосцепки до 40 мм, что допускает отклонение автосцепки на 6° вниз [31]. Этим обеспечивается погашение расчетной разности уровней осей автосцепок (с учетом неблагоприятного сочетания допусков) дополнительно на величину ≈ 70 мм.

В отличие от модели, представленной на рисунке 4.5, случайная величина $\Delta h_{\text{доп}}$ при вычислениях заменяется на детерминированную с расчетными значениями, обозначенными выше. В этом случае вероятность прохождения сцепленных вагонов через горб горки с появлением сверхнормативных нагрузок на автосцепное устройство можно определить по формуле:

$$\sum P_{\text{н}} = \eta \cdot \left[1 - \left(1 - \Phi \left(\frac{(\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)} + \Delta h_{\text{нач}}^{\max}) - \Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}}{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}} \right) + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}}{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}} \right) \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \Phi \left(\frac{(|\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}| + \Delta h_{\text{нач}}^{\max}) - |\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}|}{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}} \right) + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - |\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}|}{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}} \right) \right) \right], \quad (4.18)$$

где $\Delta h_{\text{нач}}^{\max}$ – максимальное начальное вертикальное смещение продольных осей автосцепок, образующееся при формировании состава, мм.

При ограничении $\Delta h_{\text{нач}}^{\max}$ значением, равным 100 мм, что соответствует требованиям ПТЭ [111], выражение (4.18) упростится и примет вид:

$$\sum P_{\text{н}} = \eta \cdot \left[1 - \left(0,50135 + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}}{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}} \right) \right) \cdot \left(0,50135 + \Phi \left(\frac{\Delta h_{\text{доп}} - |\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}|}{\sigma_{\Delta h_{\text{нач}}}} \right) \right) \right]. \quad (4.19)$$

Показатель $P_{\text{н}}$ не может использоваться для определения конкретных величин силовых взаимодействий и выхода из строя деталей автосцепного устройства. Данный показатель является сравнительным для оценки продольного профиля горба горки и его возможного влияния на технико-эксплуатационные показатели работы сортировочной горки.

4.3 Определение показателей прохода сцепленных вагонов через горб сортировочной горки методом имитационного моделирования

4.3.1 Моделирование прохода сцепленных вагонов через горбы проектных сортировочных горок

В настоящей диссертационной работе решается задача выбора наиболее рациональных значений радиусов вертикальных кривых горба горки и разработки рекомендаций, улучшающих эксплуатационные свойства горба горки.

Для моделирования прохода сцепов через горб горки выбраны три варианта конструкции перевальной части:

1. Вариант с наибольшей, допускаемой нормами [110], алгебраической разницей сопрягаемых уклонов надвижной и спускной частей, а также с наиболее крутым первым скоростным элементом при наименьшем допускаемом уклоне надвижной части ($\Delta i = 55 \text{ ‰}$, $i_c = 47 \text{ ‰}$, $i_n = 8 \text{ ‰}$).

2. Вариант с наличием профильного разделительного элемента на горбе горки минимальной длины при наибольшем уклоне первого скоростного элемента и наибольшей алгебраической разницей сопрягаемых уклонов надвижной и спускной частей ($l_p = 10 \text{ м}$; $i_p = 5 \text{ ‰}$, $i_c = 50 \text{ ‰}$, $\Delta i = 70 \text{ ‰}$, $i_n = 20 \text{ ‰}$).

3. Вариант с крутым противоуклоном и наибольшей алгебраической разницей сопрягаемых уклонов надвижной и спускной частей ($i_n = 20 \text{ ‰}$, $\Delta i = 55 \text{ ‰}$, $i_c = 35 \text{ ‰}$).

Все остальные варианты продольных профилей перевальной части, удовлетворяющие действующим нормам [110, 125], обеспечивают сравнимые или более мягкие условия прохода сцепленных вагонов через горб горки.

Результаты моделирования прохода сцепленных вагонов различных моделей для рассматриваемых вариантов приведены в приложении А. При расчете показателей вероятностей возникновения саморасцепа доля вагонов, оснащенных ограничителями вертикальных перемещений, принималась равной нулю, а при расчете вероятностей появления сверхнормативных нагрузок принималась равной единице. Максимальная вероятность саморасцепа ΣP_c^{\max} для вагонов, оснащаемых автосцепками типа СА-3 и СА-3М, опирающимися на центрирующий прибор с упругой (подпружиненной) опорой для хвостовика, определялась исходя из отсутствия ограничителей вертикальных перемещений, а также отсутствия вставки у замка, т. е. нормативная величина $\Delta h_{\text{доп}}$ принималась равной 180 мм, а не 250 мм¹. Кроме этого, при расчете величины ΣP_c^{\max} учитывалась возможность свободного и полного проскальзывания смежных голов автосцепок.

Результаты моделирования показывают, что существует обратная зависимость вероятностей возникновения саморасцепа вагонов и сверхнормативных нагрузок от величины радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части R_c для всех вариантов профиля и моделей вагонов (рисунок 4.8). Связано это с уменьшением обоих показателей $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ при увеличении R_c (рисунок 4.9).

¹ В этом случае также учитывается вероятная установка на длиннобазные вагоны стандартной автосцепки СА-3 вместо СА-3М, а также вероятные изломы ограничителей вертикальных перемещений на таких автосцепках.

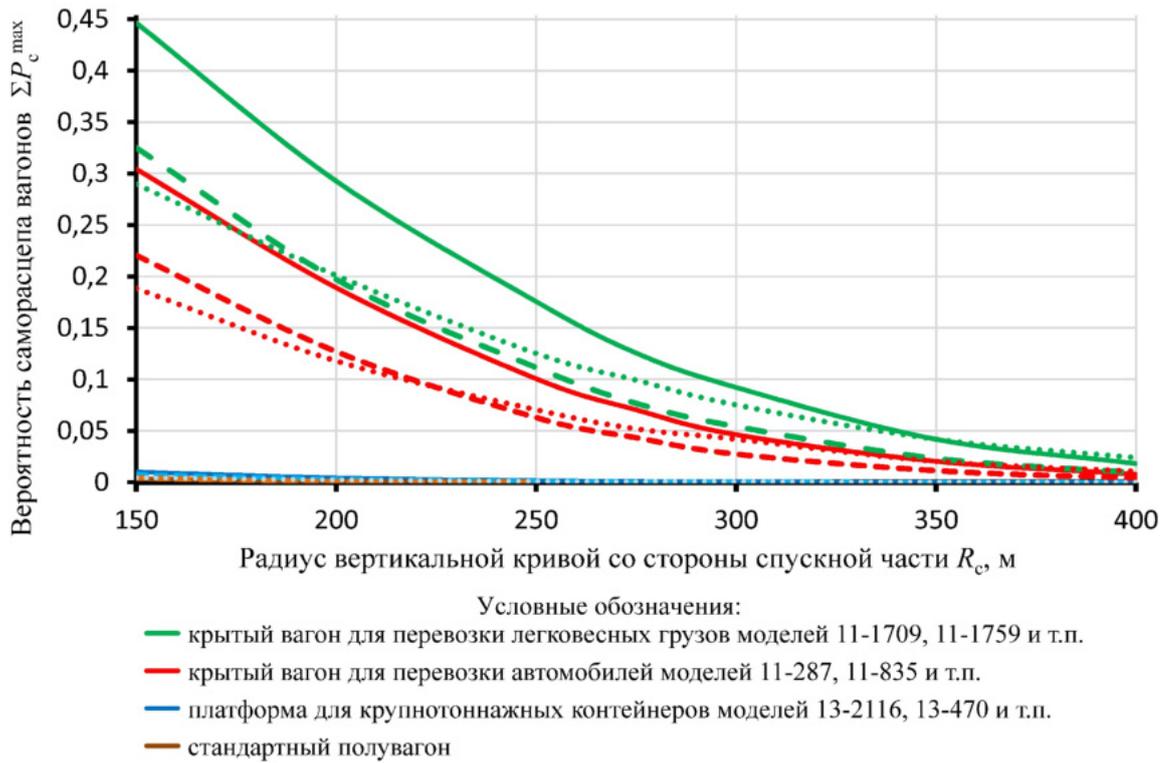


Рисунок 4.8 – Зависимость максимальной вероятности саморасцепа вагонов ΣP_c^{\max} от величины R_c (сплошной линией – для варианта профиля № 1, штриховой – для варианта № 2, пунктирной – для варианта № 3)

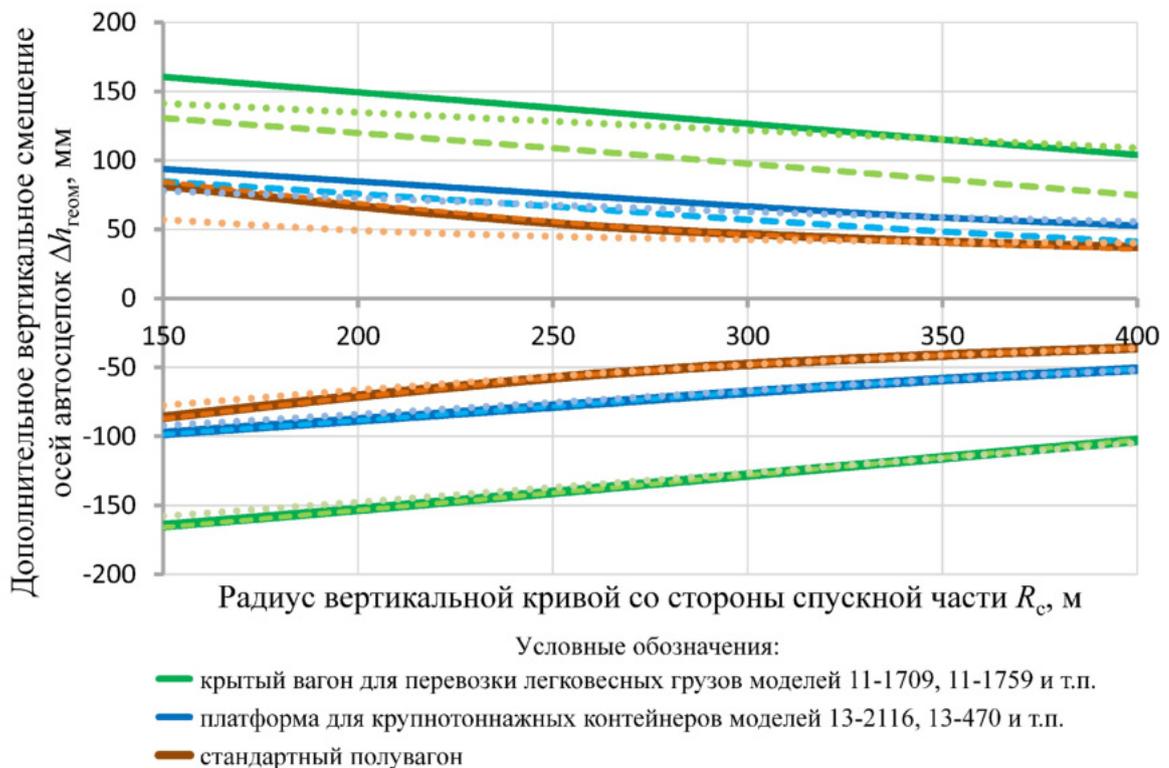


Рисунок 4.9 – Зависимость экстремумов дополнительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ от величины R_c (сплошной линией – для варианта профиля № 1, штриховой – для варианта № 2, пунктирной – для варианта № 3)

Увеличение радиуса R_c в пределах, допускаемых нормами [110] значений с 250 до 300 м, вызывает снижение показателя ΣP_c^{\max} для различных моделей длиннобазных вагонов в 1,5–3 раза, а ΣP_c^{\min} до 0. Для короткобазных вагонов даже при $R_c = 200$ м вероятность $\Sigma P_c^{\min} = 0$, а ΣP_c^{\max} настолько мала, что реальная возможность саморасцепа таких вагонов практически исключается.

Зависимость вероятностей возникновения саморасцепа вагонов и сверхнормативных нагрузок от величины радиуса вертикальной кривой со стороны подвижной части R_H носит иной характер и зависит от варианта профиля горба горки (рисунок 4.10). Различия в основном определяются разным характером зависимостей величины $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ от R_H (рисунок 4.11).

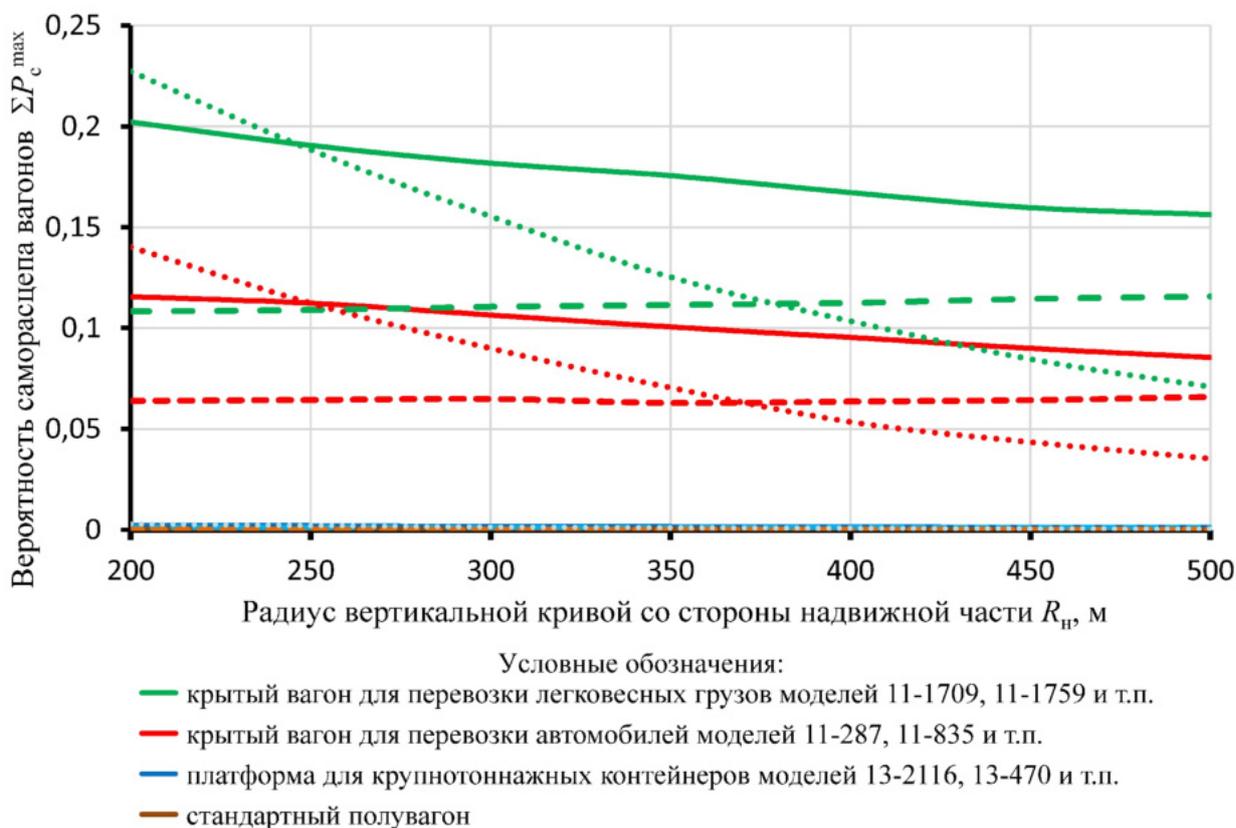


Рисунок 4.10 – Зависимость максимальной вероятности саморасцепа вагонов ΣP_c^{\max} от величины R_H (сплошной линией – для варианта профиля № 1, штриховой – для варианта № 2, пунктирной – для варианта № 3)

Увеличение радиуса R_H по варианту профиля без разделительного элемента улучшает оба показателя $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ для всех моделей вагонов. Увеличение R_H по варианту профиля с разделительным элементом улучшает показатель

$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ только для короткобазных вагонов, а для длиннобазных вагонов ухудшает его. При этом величина радиуса $R_{\text{н}}$ влияет в основном только на параметр $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$. Влияние на параметр $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ становится значимым только при крутом противуклоне и пологом скоростном элементе, т. е. для варианта профиля № 3.

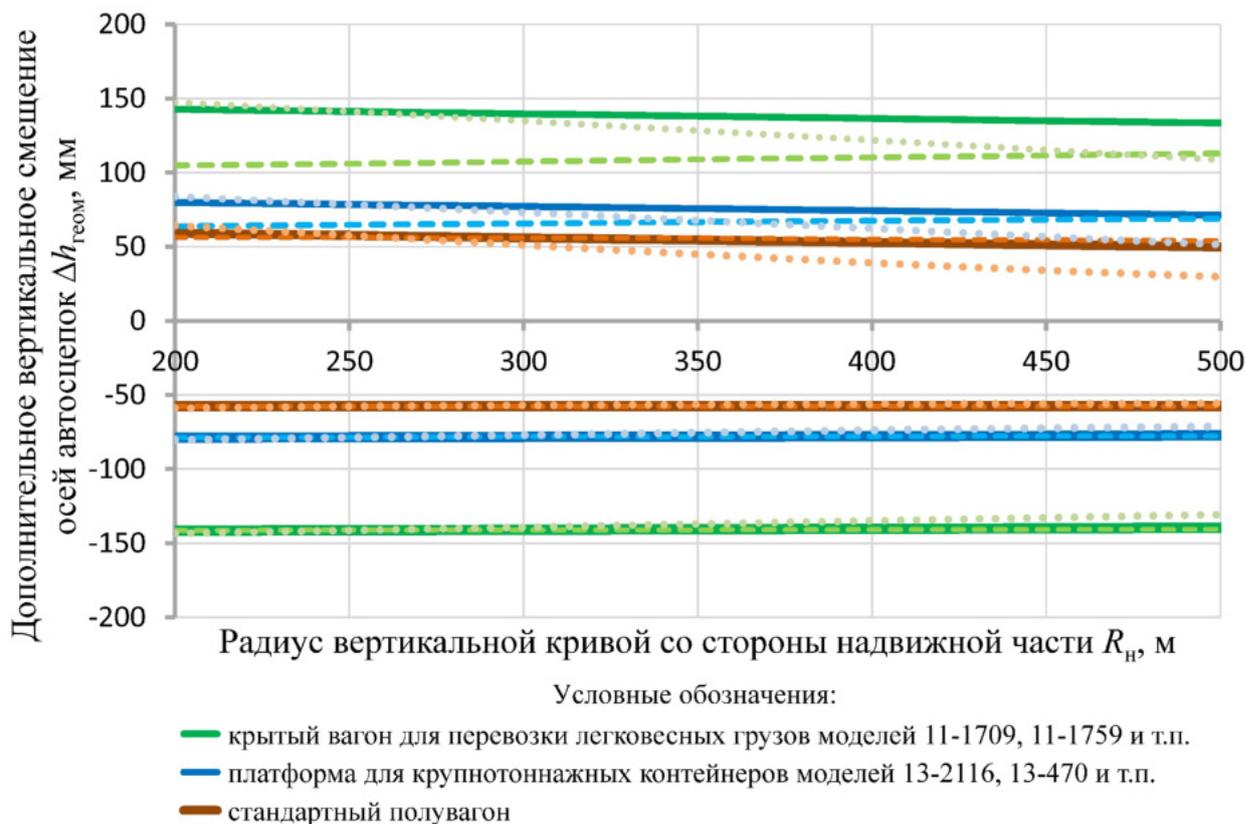


Рисунок 4.11 – Зависимость экстремумов дополнительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ от величины $R_{\text{н}}$ (сплошной линией – для варианта профиля № 1, штриховой – для варианта № 2, пунктирной – для варианта № 3)

В целом влияние радиуса $R_{\text{н}}$ на показатели прохода сцепленных вагонов через горб горки для вариантов профиля № 1 и № 2 можно оценить как незначительное. Увеличение радиуса $R_{\text{н}}$ в пределах допускаемых нормами [110] значений с 350 до 400 м улучшает показатель ΣP_c^{\max} на 5–10 % для варианта профиля № 1 и на 20–30 % для варианта профиля № 3, а показатель ΣP_c^{\min} для длиннобазных вагонов – до 0. Для продольного профиля с разделительным профильным элементом (вариант № 2) такое увеличение радиуса $R_{\text{н}}$ ухудшает показатель ΣP_c^{\max} для длиннобазных вагонов на 1–3 %, а показатель ΣP_c^{\min} оставляет практически без изменений. Для короткобазных вагонов для всех вариантов профиля даже при

$R_n = 200$ м вероятность $\Sigma P_c^{\min} = 0$, а ΣP_c^{\max} настолько мала, что реальная возможность саморасцепа таких вагонов практически исключается.

Установлено, что самым трудным по условиям прохода вагонов без саморасцепа и сверхнормативных нагрузок на автосцепные устройства является первый вариант профиля, т. е. без разделительного профильного элемента и с максимальной крутизной первого скоростного элемента.

Продольный профиль с разделительным профильным элементом (вариант №2) является более предпочтительным с точки зрения прохода сцепленных вагонов без саморасцепа и сверхнормативных нагрузок, что достигается за счет существенного снижения значения параметра $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ для длиннобазных вагонов. При этом для короткобазных вагонов условия прохода остаются практически аналогичными первому варианту профиля.

Таким образом, для проектирования рекомендуется вариант продольного профиля с разделительным профильным элементом как обеспечивающий более мягкие условия прохода длиннобазных вагонов (сравнимые с применением больших величин радиусов со стороны подвижной части при первом варианте профиля). При этом целесообразно использование наибольших уклонов первого скоростного элемента, что улучшает условия отрыва отцепов от состава. Кроме этого, на данном типе профиля обеспечивается более раннее начало взаимного отклонения по вертикали голов смежных автосцепок в зоне начала отделения отцепов из одиночных вагонов, чем обеспечиваются лучшие условия для своевременного отделения расцепленных вагонов. Длина разделительного профильного элемента рекомендуется минимальная, но не менее нормативной величины (10 м). Это позволяет улучшить при проходе горба горки показатель $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, не ухудшая при этом показатель $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ для большинства существующих моделей вагонов, в том числе и длиннобазных¹.

¹ Показатель $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ не ухудшается, если суммарная длина базы и консоли вагона ($l_b + l_k$) не превышает длину участка ($2T_c + 2T_n + l_p$) перевальной части горки, которая равна 23,75 м при $R_n = 250$ м и $R_c = 250$ м и максимальных углах перелома, а при $R_n = 350$ м и $R_c = 250$ м и максимальных углах перелома – 24,25 м.

Уменьшение величины радиуса вертикальной кривой со стороны подвижной части на продольном профиле с разделительным профильным элементом практически не влияет на условия прохода вагонов, а в некоторых случаях (для длинноразных вагонов) даже улучшает их. Связано это с тем, что на данном типе профиля уменьшение R_n незначительно ухудшает показатель $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$, однако одновременно с этим улучшается показатель $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$. Следовательно, для варианта продольного профиля горба горки с разделительным профильным элементом целесообразно уменьшить нормативное значение радиуса R_n с 350–400 м до величины 250 м. Дальнейшее уменьшение R_n ниже значения 250 м ограничивается нормами проектирования подвижного состава [29, 84], а также пропуском сцепов вагонов в соответствии с техническими условиями размещения и крепления грузов [134], регламентирующими перевозку негабаритных и тяжеловесных грузов.

Следует отметить, что при проходе вагонов через горб горки без разделительного профильного элемента при уменьшении радиуса R_n с 350 м до 250 м ни один из показателей ($\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$) не выходит за установленный предел нормативной максимальной величины $\Delta h_{\text{доп}}$. Следует учитывать, что автосцепки у всего вагонного парка будут в перспективе оснащены ограничителями вертикальных перемещений, поэтому полученная разница в вероятностях не будет значимой. В результате нормативные допуски [110] на содержание продольного профиля горба сортировочной горки целесообразно пересмотреть путем снижения минимального ограничения радиуса со стороны подвижной части горки R_n в процессе эксплуатации с 350 м до 250 м, как и установлено в настоящее время для радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части. Данное решение отвечает требованиям безопасного прохода сцепленных вагонов¹ через горб горки без повреждения автосцепного устройства и перевозимых грузов [29, 128, 134].

Кроме того, данное решение приведет к снижению числа случаев задержки отрыва отцепов от состава, связанных с плохим состоянием тяговых поверхностей зубьев автосцепок, за счет меньшей площади контакта этих поверхностей при

¹ В том числе сочлененных грузовых вагонов новых моделей, а также сцепов с грузом с опорой на два вагона

разведении автосцепок. Особенно эффективным может оказаться такое решение на продольном профиле горбов горок с крутым противоуклоном и небольшим уклоном скоростного элемента, где снижение радиуса вертикальной кривой со стороны подвижной части дает значимое увеличение параметра $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$ для наиболее массовых типов вагонов.

Также целесообразно предусмотреть в правилах и нормах проектирования [110] для сортировочных горок, обслуживающих вагонопоток преимущественно с короткобазными вагонами¹, отдельные рекомендации для выбора минимальных радиусов вертикальных кривых.

4.3.2 Моделирование прохода сцепленных вагонов через горбы эксплуатируемых сортировочных горок и сопоставление результатов с натурными наблюдениями

В качестве объектов наблюдения были выбраны две сортировочные горки с параметрами перевальной части, близкими ко второму и третьему варианту продольного профиля горбов горок, рассматриваемых выше:

– перевальная часть первой горки характеризуется наличием двух горочных путей (горбов), с проектными параметрами обоих горбов $l_p = 13$ м; $i_p = 8$ ‰, $i_c = 44$ ‰, $\Delta i = 65$ ‰, $i_n = 20$ ‰; объем переработки вагонов на данной горке составляет в среднем 4000 ваг./сут.

– перевальная часть второй горки характеризуется наличием трех горочных путей (горбов), с проектными параметрами первого горба $i_c = 33$ ‰, $\Delta i = 54$ ‰, $i_n = 21$ ‰, второго и третьего горба $i_c = 31$ ‰, $\Delta i = 51$ ‰, $i_n = 21$ ‰; объем переработки вагонов составляет в среднем 4500 ваг./сут.

Результаты моделирования приведены в таблице 4.1.

¹ Например, сортировочные горки, обслуживающие нефтеперерабатывающие заводы или места массовой погрузки полувагонов

Таблица 4.1 – Результаты моделирования прохода сцепленных вагонов через горбы эксплуатируемых горок

Модель вагона	Показатели прохода сцепленных вагонов через горб сортировочной горки по вариантам продольного профиля														
	Первый горб горки					Второй горб горки					Третий горб горки				
	$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, мм	$\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$, мм	$\sum P_c^{\min}$ $\times 10^2$	$\sum P_c^{\max}$ $\times 10^2$	$\sum P_H$ $\times 10^2$	$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, мм	$\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$, мм	$\sum P_c^{\min}$ $\times 10^2$	$\sum P_c^{\max}$ $\times 10^2$	$\sum P_H$ $\times 10^2$	$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, мм	$\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$, мм	$\sum P_c^{\min}$ $\times 10^2$	$\sum P_c^{\max}$ $\times 10^2$	$\sum P_H$ $\times 10^2$
Сортировочная горка «Н» (три горочных пути, проектные параметры перевальной части: $i_c = 31\text{--}33\%$, $i_H = 21\%$, $\Delta i = 54\%$)															
Полувагон ¹	32	33	0	0	0	38	37	0	0	0	27	70	0	0,041	0
Крытый ²	30	33	0	0	0	35	37	0	0	0	25	66	0	0,025	0
Платформа ³	45	51	0	0	0	37	50	0	0	0	41	86	0	0,207	0,105
Крытый для автомобилей ⁴	81	91	0	0,454	0	67	84	0	0,201	0	76	131	0	5,862	0
Крытый для легковесных ⁵	89	101	0	1,021	0	74	91	0	0,389	0	83	141	0,025	10,05	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	87	98	0	0,815	0	72	89	0	0,323	0	81	137	0,007	8,177	0
Платформа ⁷	86	98	0	0,795	0	74	88	0	0,312	0	79	139	0,015	9,045	0
Сортировочная горка «Ч» (два горочных пути, проектные параметры перевальной части: $l_p = 13$ м; $i_p = 8\%$, $i_c = 45\%$, $i_H = 20\%$)															
Полувагон ¹	91	85	0	0,514	0	73	74	0	0,120	0	–	–	–	–	–
Крытый ²	86	80	0	0,324	0	68	72	0	0,083	0	–	–	–	–	–
Платформа ³	86	98	0,01	0,795	0,664	81	92	0	0,484	0,293	–	–	–	–	–
Крытый для автомобилей ⁴	123	154	0,145	20,94	0,063	128	146	0,058	16,88	0	–	–	–	–	–
Крытый для легковесных ⁵	127	164	0,354	29,83	0,359	137	159	0,239	28,29	0,182	–	–	–	–	–
Крытый «ракетовоз» ⁶	128	162	0,30	28,29	0,279	136	155	0,164	24,97	0,08	–	–	–	–	–
Платформа ⁷	121	161	0,276	26,14	0,244	130	154	0,145	22,49	0,06	–	–	–	–	–
Примечание – Сноски к моделям вагонов в первом столбце соответствуют сноскам в примечании таблицы А.1 приложения А.															

Выявлены отклонения реальных продольных профилей от проектных по обеим горкам. Установлено, что фактический радиус вертикальной кривой со стороны спускной части горки «Н» по двум горбам составляет более 350 м, а по третьему горбу немногим менее 250 м. На первых двух горбах данной горки случаи саморасцепов вагонов не фиксировались, а для третьего горба являются крайне редким явлением и фиксируются не чаще одного-трех случаев в год. Случаи явного повреждения подвижного состава при проходе горбов горок отсутствуют.

На перевальной части горки «Ч» фактический радиус вертикальной кривой со стороны спускной части равен по первому горбу приблизительно 140 м, а по второму – 170 м, что значительно менее проектного значения 250 м. Было установлено, что, несмотря на такое сильное отклонение, случаи самопроизвольного расцепа вагонов при их проходе через горб горки практически отсутствуют. Вагонопоток, проходящий через рассматриваемую горку, характеризуется как смешанный, в том числе с большим числом длиннобазных вагонов разнообразных моделей. В процессе эксплуатации на данной сортировочной горке имели место редкие случаи саморасцепов на горбе следующих моделей вагонов:

- четырехосные крытые вагоны для перевозки автомобилей («сетки»);
- четырехосные крытые цельнометаллические вагоны (ЦМГВ) для перевозки легковесных грузов и автомобилей («ракетовозы»).

Как чрезвычайно редкие явления (реже одного случая в месяц) фиксировались случаи саморасцепа вагонов других моделей (в том числе крытых и полувагонов), что наиболее вероятно соответствует случаям отказа механизма сцепления у автосцепок, которые можно отнести к неисправностям.

Кроме этого, при вытягивании составов из сортировочного парка для повторной сортировки имели место случаи самоотцепа вагонов на горбе горки от маневровых локомотивов серии ТЭМ7А. При вытягивании составов маневровыми локомотивами серии ТЭМ18ДМ случаи саморасцепа не фиксировались. Связано это с более неблагоприятными геометрическими параметрами маневрового локомотива ТЭМ7А ($l_6 = 10,9$ м; $l_k = 5,3$ м) в сравнении с ТЭМ18ДМ ($l_6 = 8,8$ м; $l_k = 4,05$ м) и отклонением фактического радиуса вертикальной кривой от проект-

ного. Данные по саморасцепам длиннобазных вагонов за период наблюдения с 18.03.2015 по 14.05.2015 г. (60 смен) на горбах сортировочной горки станции «Ч» представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты натурных наблюдений прохождения сцепленных вагонов через горб сортировочной горки «Ч»

Номер горочного пути (горба)	Количество вагонов в отцепе	Саморасцеп между вагонами в отцепе					
		Номер первого вагона	Модель первого вагона	Параметры первого вагона	Номер второго вагона	Модель второго вагона	Параметры второго вагона
1	5	58618539	11-287	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м	58601667	11-287	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м
1	12	58615253	11-835	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м	58630526	11-835	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м
1	10	58621749	11-835	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м	58623018	11-835	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м
1	5	58616194	11-835	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м	58613175	11-287	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м
1	13	58615683	11-835	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м	51005460	11-287	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м
1	13	51005460	11-287	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м	58625732	11-835	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м
2	3	90885070	16-3002-03	$l_6 = 16,0$ м; $l_k = 3,078$ м	52693827	11-286	$l_6 = 12,24$ м; $l_{k1} = 2,365$ м; $l_{k2} = 3,065$ м
2	7	58606773	11-287	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м	59618579	11-287	$l_6 = 17,0$ м; $l_k = 3,63$ м
2	3	53805677	11-1709	$l_6 = 18,0$ м; $l_k = 3,81$ м	53805941	11-1709	$l_6 = 18,0$ м; $l_k = 3,81$ м

Всего в сцепе вагонов для перевозки автомобилей («сеток») моделей 11-287, 11-835, 11-835М и подобных за период наблюдений прошло через первый горб горки – 364 вагонов (из них сцепов¹ 292 единиц), через второй горб – 389 вагонов (из них сцепов 305 единиц). Фактическая вероятность саморасцепа таких вагонов составила:

- 0,0205 по первому горбу;
- 0,0033 по второму горбу.

Такие низкие значения вероятностей показывают, что даже для сильно деформированных горбов явление саморасцепа достаточно редкое.

¹ Здесь учитывается только автосцепки в сцепе. То есть, например, при проходе отцепа из пяти вагонов расчетное число сцепов вагонов считается равным четырем.

В процессе эксплуатации на данной сортировочной горке имели место редкие случаи видимого повреждения подвижного состава при проходе через горб горки (обрывы маятниковых болтов и изломы центрирующих балочек, разрыв соединений промежуточных полувагонов снегоуборочного поезда и т. п.).

В целом результаты натуральных наблюдений подтверждают результаты моделирования. Установлено, что фактическая вероятность саморасцепа вагонов, как и предполагалось ранее в подп. 4.3.1, определяется в большей степени нижним уровнем ΣP_c^{\min} , а не верхним уровнем ΣP_c^{\max} .

Существующий норматив показателя $\Delta h_{\text{доп}}$ (допускаемое по конструкции автосцепок вертикальное смещение их осей, при котором обеспечивается движение вагонов без саморасцепа), равный 180 мм для обычных автосцепок СА-3, имеет значительный резерв. Предлагаемые в работах [24, 36] значения $\Delta h_{\text{доп}}$, равные 160–165 мм, имеют явно избыточный запас. Результаты натуральных наблюдений показали, что для сцепленных вагонов с обычными автосцепками типа СА-3 (не имеющих ограничителей вертикальных перемещений) при проходе горбов горок, у которых параметр $\Delta h_{\text{геом}}$ достигает 90 мм, а в ряде случаев и выше, явление саморасцепа не характерно (отсутствует). Это позволяет рассмотреть вопрос о возможности повышения нормативного значения величины $h_{\text{доп}}$ до 185–190 мм.

Выводы по четвертой главе

В данной главе разработаны методы расчета показателей:

- максимальных значений дополнительного относительного вертикального смещения осей автосцепок смежных вагонов при проходе сцепом горба горки;
- вероятности самопроизвольного расцепления вагонов при прохождении перевальной части сортировочной горки;
- вероятности появления сверхнормативных нагрузок на автосцепки вагонов при проходе горба горки.

Предложенные методы основаны на использовании разработанной имитационной модели прохода сцепленных вагонов через горб сортировочной горки. Модель может использоваться при обосновании рациональных проектных реше-

ний по конструкции перевальной части при проектировании новых и реконструкции существующих сортировочных горок, а также для оценки эксплуатационных характеристик продольных профилей горбов горок и определения необходимости производства работ по их выправке.

Проведено моделирование прохождения сцепленных вагонов по перевальной части горки с различными предельными вариантами продольного профиля. Установлено, что самым трудным по условиям прохода вагонов без саморасцепа и сверхнормативных нагрузок на автосцепные устройства является вариант профиля без разделительного профильного элемента и максимальной крутизной первого скоростного элемента. Для проектирования рекомендуется вариант продольного профиля с разделительным профильным элементом, так как он обеспечивает более мягкие условия прохода длиннобазных вагонов, а также лучшие условия для отделения отцепов. Для данного варианта установлена целесообразность снижения величины радиуса вертикальной кривой со стороны подвижной части до 250 м.

Для верификации модели проведены исследования процесса прохождения сцепленными вагонами перевальной части на эксплуатируемых горках. Установлено, что имеют место такие негативные явления, как саморасцеп вагонов при проходе горба горки или даже повреждение подвижного состава, а также несвоевременное отделение отцепов от состава. Основной причиной является несоответствие фактических параметров продольного профиля сортировочных горок нормативным требованиям, вследствие несвоевременной выправки или недостаточного контроля за состоянием горбов горок, особенно за соблюдением радиусов вертикальных кривых, сопрягающих подвижную и спускную части горки.

Появление случаев саморасцепа и повреждения подвижного состава при прохождении горба горки, соответствующего нормативным требованиям, маловероятно. Следовательно, появление таких случаев при эксплуатации свидетельствует о необходимости выправки перевальной части.

Результаты моделирования и проведенных в данной главе исследований условий прохождения вагонами горбов сортировочных горок могут быть использованы для уточнения и дополнения правил и норм проектирования, а также норм содержания профиля горочных путей.

5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПЕРЕВАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

5.1 Формулировка задачи

Анализ материалов съемки продольных профилей горбов эксплуатируемых горок показал, что имеются отклонения от Правил и норм проектирования и положений Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути [110, 125], в частности:

- минимальные значения радиусов вертикальных кривых, сопрягающих скоростной участок и вершину горки, могут быть менее 250 м;
- максимальные значения радиусов вертикальных кривых, сопрягающих скоростной участок и вершину горки, могут быть более 300 м;
- на большинстве горок имеются местные отклонения профиля пути в зоне горба горки, достигающие сверхнормативных значений (более 10 мм [110]);
- искажения могут приводить к изменению формы горба горки, например, к ступенчатому или пилообразному (зубчатому) очертанию продольного профиля.

В настоящее время оценка проектного продольного профиля горба горки по критерию проходимости вагонов без саморасцепа производится аналитическими методами, которые не учитывают наличие местных искажений и отклонений, возникающих в процессе эксплуатации [44, 84, 127].

На практике производится периодическая инструментальная съемка и анализ продольного профиля перевальной части горки. Использование аналитических методов может приводить к погрешности при определении усредненных радиусов вертикальных кривых, в том числе в связи с принятой точностью составления технической документации. Поэтому предлагается производить оценку профиля перевальной части на основании имитационного моделирования процесса прохода вагонов через горб горки по критериям [93]:

- прохождения вагонов без возникновения случаев самопроизвольного расцепления и сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов (K_1);

– своевременному отделению отцепов от состава (K_2).

5.2 Выбор расчетных моделей вагонов для оценки качества продольного профиля перевальной части горки

На сортировочных горках перерабатывается большое число типов и моделей вагонов. Для оценки проходимости сцепов по горбу горки целесообразно использовать модели вагонов с неблагоприятными параметрами. Особые затруднения при проходе горбов горки испытывают длиннобазные вагоны. Поэтому выбор расчетных моделей вагонов для оценки проходимости сцепов через горб горки целесообразно производить из длиннобазных вагонов, оборудованных типовыми (СА-3) или модернизированными автосцепками (СА-3М и др.), которые имеют наиболее неблагоприятные линейные параметры по критерию K_1 . Прохождение таких сцепленных вагонов через горб сортировочной горки при определенных условиях может сопровождаться самопроизвольным расцеплением, а также сверхнормативным силовым взаимодействием их через автосцепки.

Произведен анализ эксплуатируемого вагонного парка и выделена группа моделей грузовых вагонов, имеющих наиболее неблагоприятные параметры для прохода горбов горок [93]. Из всех моделей вагонов, разрешенных для пропуска через горб горки, наибольшие затруднения при проходе перевальной части выявлены у вагонов для перевозки автомобилей и легковесных грузов, а также у некоторых моделей специализированных платформ. Для данных вагонов свойственны максимальные значения величины дополнительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$.

В качестве примера в таблице 5.1 представлены расчетные значения величины $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ для различных вагонов, полученные с использованием имитационной модели (см. п. 4.2) при проходе по горбу горки с переломом 55 ‰ между плоскостями надвижной и спускной частей, сопряженным вертикальной кривой с радиусом 250 м.

Таблица 5.1 – Расчетные величины $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ для различных моделей вагонов

Модель вагона	Размеры вагона			Тип автосцепки		Максимальное значение дополнительного относительного вертикального смещения автосцепок ($\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$), мм
	Число осей	База вагона l_6 , м	Длина консоли вагона до оси сцепления l_k , м	Стандартная СА-3 с центрирующим прибором жесткого типа ($\Delta h_{\text{доп}} = 180$ мм)	Модернизированная СА-3 с центрирующим прибором с упругой опорой хвостовика ($\Delta h_{\text{доп}} = 250$ мм)	
1	2	3	4	5	6	7
Стандартный крытый вагон моделей 11-217, 11-К001, 11-264, 11-270, 11-274 и подобных	4	10,0	2,365	+	–	57
Крытый вагон моделей 11-280, 11-9769 и подобных	4	12,24	2,365	+	–	67
Крытый вагон модели 11-1807 и подобных	4	11,70	2,635	+	–	72
Крытый вагон с переходной площадкой модели 11-276 и подобных	4	10,0	2,365 2,995	+	–	75
Крытый вагон модели 11-1807-01 и подобных	4	13,14	2,85	–	+	86
Крытый вагон для перевозки автомобилей моделей 11-287, 11-287-01, 11-835, 11-720, 13-9752, 11-835М, 11-835-01 и подобных	4	17,0	3,63	–	+	131
Крытый вагон для перевозки автомобилей и легковесных грузов моделей 11-9759, 11-9733, 11-9733-01, 11-1804	4	17,0	3,81	–	+	138
Крытый вагон для перевозки автомобилей и легковесных грузов модели 11-К651	4	17,0	3,84	–	+	139
Крытый вагон ЦМГВ для транспортировки специальных изделий моделей 15Т192, 15Т197, 15Т223, 15Т287, 8Т712 и подобных	4	17,0	3,84	–	+	139
Крытый вагон ЦМГВ для легковесных грузов моделей 11-1709, 11-1759 и подобных	4	18,0	3,81	–	+	141

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6	7
Стандартный полувагон модели 12-132, 12-296, 12-783 и подобных	4	8,65	2,635	+	–	58
Стандартная платформа модели 13-2114 и подобных	4	9,72	2,45	+	–	58
Стандартная платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-2116, 13-1223, 13-1798, 13-9004 и подобных	4	14,72	2,45	+	–	79
Платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров и колесной техники 13-935, 13-935А и подобных	4	14,40	2,61	–	+	83
Платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-1798 и подобных	4	13,46	3,08	–	+	96
Платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-3115-1 и подобных	4	19,70	3,08	–	+	116
Платформа для перевозки длинномерных грузов модели 13-4092	4	20,78	3,11	–	+	119
Платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-9834 и подобных	4	19,0	3,31	–	+	124
Платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-2118, труб и длинномерного листового проката модели 13-2118-03, леса и пиломатериалов 13-4128 и подобных	4	19,0	3,61	–	+	136
Платформа для перевозки рельсов длиной 25 м модели 13-3066	8	18,6	3,865	–	+	140
Стандартный вагон-цистерна	4	7,8	2,11	+	–	40
Вагон-цистерна для нефтепродуктов модели 15-871	8	13,79	3,665	–	+	114
Вагон-цистерна для нефтепродуктов модели 15-880	8	10,52	4,085	–	+	110
Стандартный изотермический вагон моделей 16-380, 16-3000, 16-3002 и подобных	4	16,0	3,078	–	+	104

Для исследования проходимости сцепов по перевальной части горки по критерию K_1 определены следующие расчетные модели вагонов [93]:

- за расчетную модель № 1 четырехосного вагона, оборудованного модернизированной автосцепкой СА-3 с центрирующим прибором с упругой опорой хвостовика и параметром $\Delta h_{\text{доп}} = 250$ мм, принимается крытый вагон для легко-весных грузов модели 11-1709 и подобных длиной 25,62 м, имеющий размеры базы $l_6 = 18,0$ м и консоли $l_k = 3,81$ м;

- за расчетную модель № 2 четырехосного вагона, оборудованного стандартной автосцепкой СА-3 с центрирующим прибором жесткого типа и параметром $\Delta h_{\text{доп}} = 180$ мм, принимается стандартная платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-2116 и подобных длиной 19,62 м, имеющую размеры базы $l_6 = 14,72$ м и консоли $l_k = 2,45$ м.

Линейные размеры указанных моделей вагонов обеспечивают значения расчетной величины $\Delta h_{\text{геом}}$, находящиеся близко к предельным уровням ($\Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{\text{нач}}$), установленным нормами для расчета и проектирования вагонов [84].

Для оценки качества продольного профиля по критерию K_2 требуется определение значения радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части. При этом предлагается использовать дополнительную расчетную модель вагона № 3. Это «абстрактный» короткобазный вагон с задаваемыми линейными параметрами, при которых его база не будет превышать длину вертикальной кривой на горбе горки. Это обеспечит более достоверное определение значения усредненного радиуса вертикальной кривой, так как уменьшит влияние просадок и прочих деформаций пути вне вертикальной кривой.

5.3 Разработка методики оценки продольного профиля перевальной части сортировочных горок

Предлагаемая методика оценки продольного профиля перевальной части основана на показателях, получаемых с использованием имитационной модели прохода вагонов через горб горки, представленной в п. 4.2.

Анализ текущего состояния перевальной части горки по предлагаемой методике производится сравнением показателей $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(-)}$, получаемых в результате моделирования прохода расчетных моделей по исследуемому фактическому горбу, с показателями, получаемыми в результате моделирования прохода вагонов по «эталонному» горбу (очертание которого соответствует проектной линии продольного профиля исследуемой горки) [93].

Превышение абсолютных значений исследуемых величин $\Delta h_{\text{геом}}^{\max}$ над «эталонными» свидетельствует о том, что фактические значения радиусов вертикальных кривых меньше проектных. Меньшие абсолютные значения исследуемых величин $\Delta h_{\text{геом}}^{\max}$ по сравнению с «эталонными» свидетельствуют, что фактические значения радиусов вертикальных кривых выше проектных.

Очевидно, что необходимо установить допускаемые границы исследуемого параметра $\Delta h_{\text{геом}}^{\max}$, в пределах которых состояние продольного профиля горба горки можно оценить как удовлетворительное. Выход за обозначенные границы требует проведения выправки продольного профиля горба горки.

Правилами и нормами [110] допускаются местные отклонения продольного профиля перевальной части, которые составляют до минус 10 мм на 10–15 м участка пути. Это означает, что не допускается уменьшение значений радиусов вертикальных кривых менее 250 м. Исходя из этого, для оценки продольного профиля эксплуатируемых горбов сортировочных горок по критерию K_1 целесообразно установить два уровня допустимой верхней границы показателя $\Delta h_{\text{геом}}^{\max}$:

– максимальный проектный уровень $\Delta h_{\text{проект}}^{\max}$ соответствует величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\max}$, получаемой при моделировании прохода вагонов на «эталонном» горбе при установленных согласно проекту параметрах надвижной, перевальной и спускной частей горки (длин прямолинейных элементов и величин их уклонов) и значениях радиусов сопрягающих вертикальных кривых на горбе горки, равных минимальным допустимым значениям $R_c = 250$ м, $R_n = 350$ м;

– максимальный критический уровень $\Delta h_{\text{крит}}^{\max}$ соответствует величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\max}$, получаемой при моделировании прохода вагонов по горбу горки с переломом

55 ‰ между плоскостями подвижной и спускной частей, сопряженными вертикальной кривой с радиусом 250 м.

Если величина $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ превышает максимальный проектный уровень $\Delta h_{\text{крит}}^{\text{max}}$, значит, фактический радиус сопрягающей кривой на горбе горки в результате искажения продольного профиля горочного пути вышел за допустимые границы и имеет значение ниже 250 м.

Превышение исследуемой величиной $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ максимального критического уровня $\Delta h_{\text{крит}}^{\text{max}}$ также показывает, что фактический радиус сопрягающей кривой на горбе горки в результате искажения продольного профиля горочного пути имеет значение меньше 250 м, при этом создается угроза повреждения подвижного состава и грузов, перевозимых в сцепе с опорой на два вагона. Соответственно, требуется выправка продольного профиля горба горки.

Для сортировочных горок, имеющих суммарную крутизну сопрягаемых на горбе уклонов, равную $\Delta i = 55 \text{ ‰}$, значения $\Delta h_{\text{проект}}^{\text{max}}$ и $\Delta h_{\text{крит}}^{\text{max}}$ могут быть равны, а для горок, у которых $\Delta i < 55 \text{ ‰}$, значение $\Delta h_{\text{проект}}^{\text{max}} < \Delta h_{\text{крит}}^{\text{max}}$.

Нормами также установлены максимальные значения допускаемых искажений продольного профиля перевальной части, которые фактически определяют максимально допустимые отклонения радиусов вертикальных кривых в верхнем диапазоне значений до 10 ‰. Исходя из этого, для оценки продольного профиля эксплуатируемых горбов сортировочных горок по критерию K_2 целесообразно установить следующие уровни нижней границы показателя $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$:

– минимальный проектный уровень $\Delta h_{\text{проект}}^{\text{min}}$ соответствует величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$, получаемой при моделировании прохода вагонов на «эталонном» горбе и значениях радиусов сопрягающих вертикальных кривых на горбе горки, равных максимальным нормативным проектным значениям $R_c = 300 \text{ м}$, $R_H = 400 \text{ м}$;

– минимальный критический уровень $\Delta h_{\text{крит}}^{\text{min}}$ соответствует величине $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$, получаемой при моделировании прохода вагонов на «эталонном» горбе при значениях радиусов сопрягающих вертикальных кривых на горбе горки, равных максимально допустимым значениям $R_c = 330 \text{ м}$, $R_H = 440 \text{ м}$.

Если исследуемая величина $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ ниже минимального проектного уровня $\Delta h_{\text{проект}}^{\text{min}}$, следовательно, значения фактического радиуса сопрягающей кривой выходят за предельные значения, установленные проектом.

Отклонение исследуемой величины $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ ниже минимального критического уровня $\Delta h_{\text{крит}}^{\text{min}}$ показывает, что фактический радиус сопрягающей кривой на горбе горки R_c в результате искажения продольного профиля горочного пути превышает 330 м. В результате ухудшаются условия отделения отцепов от состава, учащаются случаи «неразделения» и «утягивания» отцепов, снижается скорость роспуска и, соответственно, перерабатывающая способность горки. Следовательно, требуется проведение выправки продольного профиля горба горки.

Фактические усредненные значения радиусов вертикальных кривых (R_c и R_n) на исследуемых горбах горок можно определить по зависимости показателя $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ от радиуса вертикальной кривой, сопрягающей элементы «эталонного» горба со стороны спускной части горки (рисунок 5.1). Зависимости устанавливаются многократным итерационным моделированием прохода сцепленных вагонов расчетных моделей по перевальной части горки при различных значениях радиуса вертикальной кривой. Результаты моделирования характеризуют в целом условия прохода через горб эксплуатируемой горки с учетом местных искажений перевальной части. Поэтому получаемый по зависимостям (см. рисунок 5.1) усредненный радиус вертикальной кривой принимается за эквивалентный.

Величина эквивалентного усредненного радиуса является комплексным показателем, характеризующим не только параметр усредненного радиуса самой вертикальной кривой, сопрягающей надвижную и спускную части, а также и искажения прямолинейных элементов профиля, непосредственно примыкающих к ней. Таким образом, его величина определяет такие условия прохода вагонами горба эксплуатируемой горки, которые будут аналогичны условиям прохода по горбу «идеальной» (эталонной) горки с радиусом сопряжения вертикальной кривой, равным величине полученного при анализе качества профиля эквивалентного усредненного радиуса.

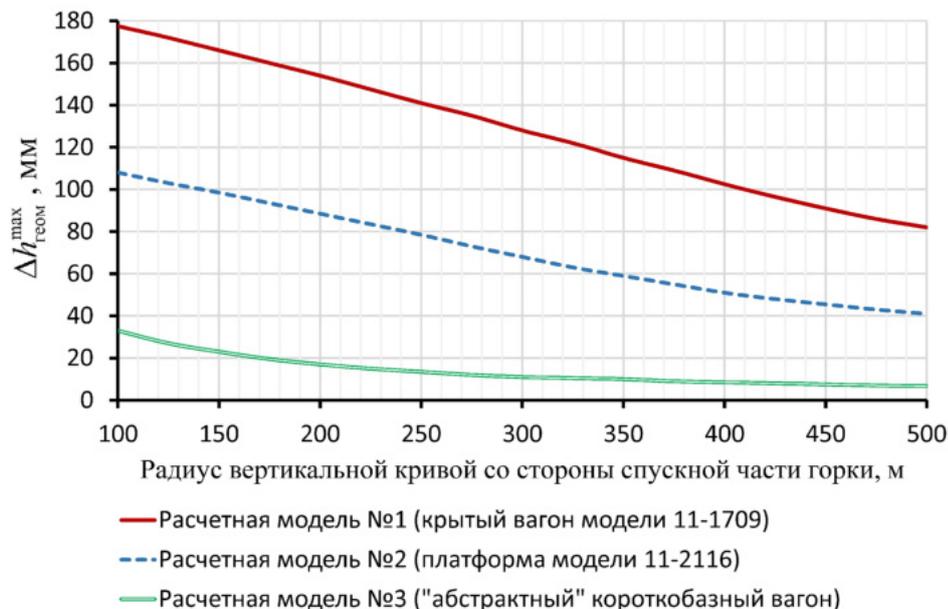


Рисунок 5.1 – Пример зависимости величины $\Delta h_{\text{геом}}^{\max}$ от радиуса вертикальной кривой для горки с переломом 55‰ между плоскостями подвижной и спускной частей

Таким образом, использование предлагаемой методики позволяет, в отличие от обычных методов контроля состояния горбов по величинам усредненных радиусов вертикальных кривых, оценивать конкретные сложившиеся эксплуатационные показатели ($\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$, ΣP_c^{\max} , ΣP_c^{\min} , P_n и др.) в условиях произвольно деформированного очертания профиля и наличия местных искажений по всей длине перевальной части горки. Также метод позволяет более точно оценивать эквивалентную усредненную величину радиусов сопрягающих вертикальных кривых. Пример применения вышеприведенной методики представлен в п. 5.5.

5.4 Разработка программного комплекса для оценки качества продольного профиля перевальной части горки

Для имитационного моделирования прохода вагонов по перевальной части сортировочной горки и расчета эксплуатационных показателей данного процесса разработан программный комплекс «Горб горки – Проверка профиля» (приложение Д) [99]. Главное окно программного комплекса представлено на рисунке 5.2.

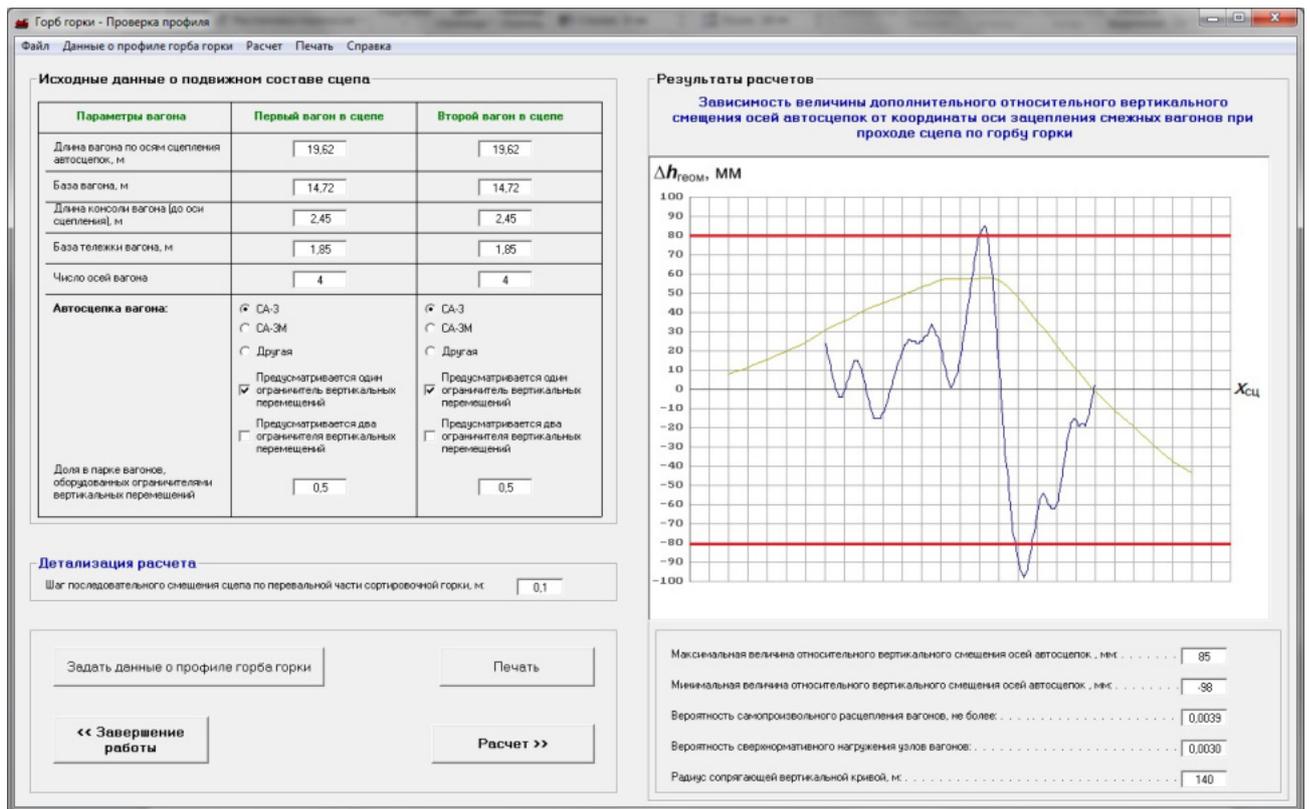


Рисунок 5.2 – Главное окно программного комплекса «Горб горки – Проверка профиля»

С использованием программного комплекса могут быть определены следующие показатели: экстремумы величин относительного дополнительного вертикального смещения осей смежных автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(-)}$; вероятности самопроизвольного расцепления вагонов в сцепе при проходе через горб горки ΣP_c^{\max} и ΣP_c^{\min} ; вероятность сверхнормативного нагружения узлов вагонов при проходе горба горки в сцепленном состоянии P_n ; величина эквивалентного усредненного радиуса сопрягающей вертикальной кривой R_c .

Основная область применения программы – оценка качества и мониторинг текущего состояния продольного профиля горбов горок для выявления необходимости их выправки. Также программа позволяет проводить исследование влияния различных проектных конструкций перевальных частей сортировочных горок на их эксплуатационные свойства и определять рациональную конструкцию продольного профиля горба горки.

к максимальным, при минимальных значениях радиусов сопряжения). Для оценки соответствия продольного профиля горба горки нормам [110] выполнено моделирование прохода сцепов расчетных моделей вагонов, результаты которого приведены в таблице 5.2 и на рисунке 5.4.

Таблица 5.2 – Сводная таблица оценки соответствия продольного профиля горба горки «Ч» нормативным требованиям (съемка 2013 г.)

Параметр	Расчетные модели вагонов		
	Крытый вагон модели 11-1709	Платформа модели 11-2116	«Абстрактный» короткобазный вагон
Фактическое значение величины $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$, мм	164	98	25
Максимальный проектный уровень $\Delta h_{\text{проект}}^{\text{max}}$, мм	138	77	14
Максимальный критический уровень $\Delta h_{\text{крит}}^{\text{max}}$, мм	141	79	14
Минимальный проектный уровень $\Delta h_{\text{проект}}^{\text{min}}$, мм	126	68	11
Минимальный критический уровень $\Delta h_{\text{крит}}^{\text{min}}$, мм	118	62	10
Ориентировочное значение усредненно- го радиуса сопрягающей вертикальной кривой (с учетом деформаций пути), м	135	140	135
Соответствие продольного профиля горба правилам и нормам [110, 125]	Не соответ- ствует, радиус менее 250 м	Не соответ- ствует, радиус менее 250 м	Не соответ- ствует, радиус менее 250 м

Некоторые отличия в значениях радиусов, полученные для разных моделей, вызваны особенностями прохождения конкретного вагона через горб горки, обусловленными имеющимися на горке местными отклонениями профиля. По результатам оценки было выявлено, что горб горки не соответствует предъявляемым к нему нормативным требованиям [110], так как радиус сопряжения спускной части с горбом горки значительно меньше установленного, а именно: менее 150 м вместо 250 м. Для исключения случаев самопроизвольного расцепления вагонов и повреждения деталей автосцепного устройства следует произвести выправку продольного профиля.

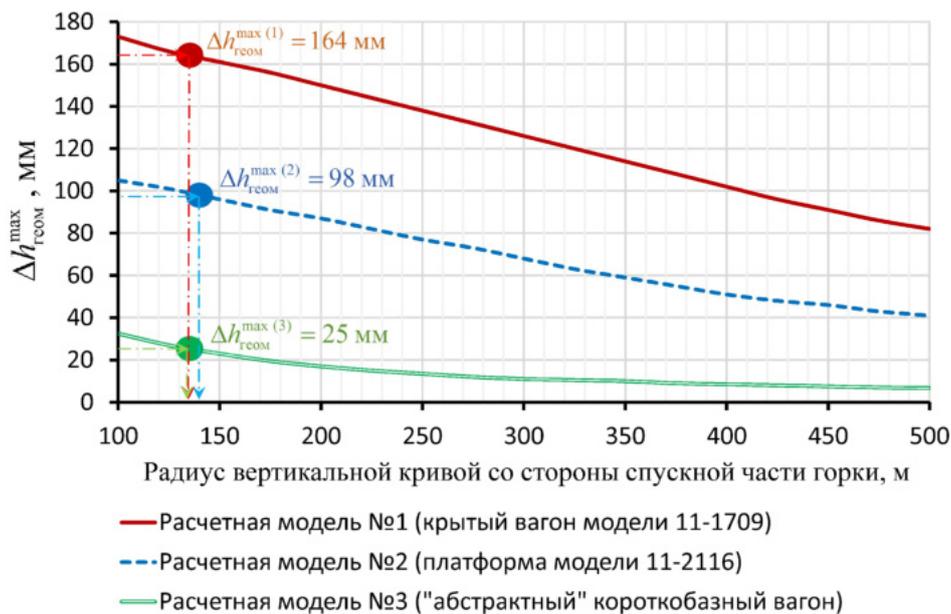


Рисунок 5.4 – Определение фактических радиусов вертикальных кривых по зависимостям значений $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ от величин проектного радиуса вертикальной кривой для горба сортировочной горки «Ч»

Достоверность проведенных расчетов и сделанных выводов подтверждается присутствием фактов самопроизвольного расцепления вагонов, а также наличием случаев повреждения автосцепных устройств подвижного состава (обрыв маятниковых болтов, изломы ограничителей вертикальных перемещений и т. п.) на сортировочной горке станции «Ч» в период 2013–2014 гг.

Также произведено обследование горбов ряда других эксплуатируемых сортировочных горок. В качестве примера в таблице 5.3 представлены результаты моделирования и оценки состояния продольного профиля двух горок.

По результатам расчетов установлено, что продольный профиль перевальной части горбов многих сортировочных горок не в полной мере соответствует нормам. Это приводит к затруднениям в работе сортировочных горок, снижению скорости роспуска и уменьшению их перерабатывающей способности. Например, как видно из таблицы 5.3, профиль сортировочной горки «Ч» в период 2004–2007 гг. ухудшился до состояния, угрожающего повреждением подвижного состава и безопасности проведения маневровой работы.

Таблица 5.3 – Сводная таблица оценки качества продольного профиля горбов сортировочных горок «Н» и «Ч»

Год проведения инструментальной съемки	Параметры оценки качества продольного профиля горбов сортировочной горки														
	Первый горб горки					Второй горб горки					Третий горб горки				
	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}, \text{мм}^*$			$R_c, \text{м}^{**}$	C^{***}	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}, \text{мм}^*$			$R_c, \text{м}^{**}$	C^{***}	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}, \text{мм}^*$			$R_c, \text{м}^{**}$	C^{***}
	1	2	3			1	2	3			1	2	3		
Сортировочная горка «Н» (три горочных пути, проектные параметры перевальной части: $i_c = 31\text{--}33\%$, $i_n = 21\%$, $\Delta i = 52\text{--}54\%$)															
2004	57	111	11	340 340 300	(-) K_2	56	103	10	335 465 350	(-) K_2	89	149	17	200 220 200	(-) K_1
2007	53	109	10	365 355 350	(-) K_2	49	91	9	375 415 375	(-) K_2	87	145	17	210 235 200	(-) K_1
2009	46	96	8,5	430 405 400	(-) K_2	54	95	9	350 395 375	(-) K_2	80	139	14	240 255 245	(+)
2013	51	102	9	380 380 375	(-) K_2	50	91	9	475 415 375	(-) K_2	86	141	16	215 240 215	(-) K_1
Сортировочная горка «Ч» (два горочных пути, проектные параметры перевальной части: $l_p = 13 \text{ м}$; $i_p = 8\%$, $i_c = 45\%$, $i_n = 20\%$, $\Delta i = 65\%$)															
2004	63	120	11	325 330 300	(+)	77	133	14	250 270 245	(+)	–	–	–	–	–
2007	103	172	27	115 110 125	(-) K_1	89	160	20	190 160 170	(-) K_1	–	–	–	–	–
2009	95	166	24	150 125 140	(-) K_1	89	159	19	190 165 180	(-) K_1	–	–	–	–	–
2013	98	164	25	135 140 135	(-) K_1	92	159	20	170 165 170	(-) K_1	–	–	–	–	–
<p>* – фактическое значение величины $\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}}$ для расчетных моделей, соответственно, №1, №2 и №3.</p> <p>** – значение эквивалентного радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части для расчетных моделей, соответственно, №1, №2 и №3.</p> <p>*** – соответствие нормативным требованиям [110, 125], (+) – да, (-) – нет, с указанием несоответствия по критерию K_1 или K_2.</p>															

5.6 Методика технико-экономического сравнения вариантов продольного профиля перевальной части сортировочных горок

5.6.1 Оценка влияния продольного профиля перевальной части горки на перерабатывающую способность

При проектировании и реконструкции сортировочных горок зачастую ставится задача сравнения вариантов продольного профиля перевальной части и выбора наиболее рационального, с учетом обеспечения потребного уровня перерабатывающей способности [91].

Выполненные в данной работе исследования показали, что параметры продольного профиля горба горки влияют на следующие показатели:

- число случаев саморасцепа вагонов на горбе горки;
- число случаев повреждения автосцепного устройства вагонов;
- число случаев нерасцепов вагонов;
- скорость роспуска составов.

Самопроизвольное расцепление при проходе вагонов в сцепленном состоянии через горб горки явление достаточное редкое. Как показывает практический опыт эксплуатации горок, даже при радиусах сопрягающих вертикальных кривых на горбе горки значительно ниже нормативных (менее 200 м) явление саморасцепа наблюдается в единичных случаях (значительно реже одного раза в сутки). Поэтому можно считать, что на перерабатывающую способность данное явление в настоящее время влияния практически не оказывает.

Видимое повреждение автосцепного устройства вагонов (обрыв маятниковых болтов, излом центрирующей балочки и т. п.) также явление редкое. На перерабатывающую способность сортировочной горки влияния также не оказывает, так как выявляется и исправляется в парке отправления.

Таким образом, основным негативным фактором, зависящим от продольного профиля перевальной части и влияющим на перерабатывающую способность сортировочной горки, являются нерасцепы вагонов.

Кроме этого, на перерабатывающую способность горки оказывает влияние положения отцепов в момент их отрыва от состава, от которых зависит образование начальных пространственных интервалов между отцепами и, соответственно, максимально реализуемая скорость роспуска состава.

Таким образом, для количественной оценки влияния конструкции продольного профиля перевальной части на перерабатывающую способность горки при сравнении вариантов достаточно учитывать два основных показателя, влияющих на горочный технологический интервал [91]:

- изменение числа нерасцепов вагонов на горбе горке;
- изменение реализуемой скорости роспуска.

Определение числа нерасцепов и их влияния на горочный технологический интервал

В исследованиях [1, 151] установлено, что значительное влияние на перерабатывающую способность горки оказывают нерасцепы в составах при роспуске. Получены следующие результаты:

- вероятность остановок роспуска P_n из-за нерасцепов в среднем по сети составляет 0,32 (32 остановки на 100 составов);
- средняя задержка роспуска из-за одной остановки 2,4 мин.;
- вероятность остановок роспуска в значительной степени определяется технологией ликвидации нерасцепов вагонов;
- на горках, где нерасцепы устраняются горочными составителями поездов с остановкой роспуска, среднее время на ликвидацию одного нерасцепа составляет 2 мин, а с учетом времени на разгон и торможение состава – 3 мин;
- на горках (как правило, с суточной переработкой более 4000 вагонов), где нерасцепившиеся отцепы направляются на отдельные пути без остановки роспуска, среднее время на ликвидацию одного нерасцепа составляет около 5 мин. По окончании роспуска или частично с совмещением с другим роспуском нерасцепившиеся отцепы («чужаки») переставляются маневровым локомотивом на пути назначения. При наличии достаточного количества локомотивов и управлении

процессом роспуска квалифицированным дежурным по горке (ДСПГ) среднее время задержек в работе горки значительно меньше и не превышает продолжительности ликвидации одного нерасцепа с остановкой роспуска;

– общее число нерасцепов зависит от суточной переработки и средней длины отцепов. Для среднесетевых условий (средняя длина отцепа – два вагона) при увеличении переработки вагонов на горке с 3 тыс. до 7 тыс. среднее число нерасцепов увеличивается с 13–15 до 32–35 случаев в сутки, а потери времени на их устранение – с 40 до 100 мин.

Для конкретной сортировочной горки показатели могут быть установлены индивидуально. Отдельные показатели для современных среднесетевых условий могут быть уточнены. Для примера в таблице 5.4 представлены показатели по нерасцепам вагонов для двух горок сортировочных станций с последовательным расположением парков [151, с. 82].

Таблица 5.4 – Показатели по нерасцепам вагонов

Горка	Вероятность остановок роспуска P_n , 1/состав	Среднее время на ликвидацию нерасцепа, мин	Среднее время на ликвидацию нерасцепа в расчете на один состав, мин
Автоматизированная	0,20	1,8	0,36
Механизированная	0,35	2,3	0,80

Известно, что более крутой продольный профиль с минимально допустимыми радиусами сопрягающих вертикальных кривых обеспечивает значительно меньшее число нерасцепов вагонов по сравнению с пологим профилем, где спускная часть сопряжена с надвижной частью вертикальными кривыми большего радиуса. Установлено, что первый вариант продольного профиля обеспечивает лучшие показатели за счет [91]:

– лучших динамических («разгонных») характеристик для скатывающихся отцепов;

– меньшей вероятности схватывания («залипания») тяговых поверхностей большого и малого зубьев автосцепок.

Меньшая вероятность схватывания («залипания») тяговых поверхностей большого и малого зубьев автосцепок обуславливается большим взаимным смещением автосцепок, вызванным проходом отцепов по профилю горба горки (показателем которого является ранее рассматриваемая величина $\Delta h_{\text{геом}}$). Большее смещение (взаимный «ход» автосцепок) снижает вероятность взаимного контакта изношенных, имеющих коррозию или некачественно обработанных участков плоскостей зубьев взаимодействующих автосцепок. Это достигается за счет большей длины участка вертикального скольжения тяговых плоскостей зубьев автосцепок и возможности «отпускания» залипших автосцепок в результате прохода участка поверхности, имеющей дефекты.

Ранее было установлено, что показатель дополнительного вертикального смещения осей автосцепок $\Delta h_{\text{геом}}$ имеет два экстремума:

- 1) $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ – в районе начала вертикальной кривой перед горбом горки со стороны подвижной части;
- 2) $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ – в районе конца вертикальной кривой за горбом горки со стороны спускной части.

Очевидно, что на снижение вероятности появления нерасцепов и затруднений с отделением отцепов может влиять только показатель $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$, так как $\Delta h_{\text{геом}}^{\min(-)}$ может оказывать влияние только на расцеп вагонов уже на значительном удалении за горбом горки, что фактически приводит к появлению «чужака»¹.

С некоторой долей допущения можно считать, что существует обратно пропорциональная зависимость между величиной $\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ и вероятностью появления нерасцепа вагонов $P_{\text{н}}$, вызванного состоянием тяговых поверхностей автосцепок. В этом случае появляется возможность сравнения различных конфигураций продольного профиля горбов горок по показателю $P_{\text{н}}$. Для этого можно воспользоваться зависимостью:

$$P_{\text{н}} = k_{\text{н}} P_{\text{н(Б)}} = \frac{\Delta h_{\text{геом(Б)}}^{\max(+)}}{\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}} P_{\text{н(Б)}}, \quad (5.1)$$

¹ «Чужаки» – отцепы, направленные не на свой путь назначения.

где k_n – коэффициент, характеризующий продольный профиль исследуемой горки по показателю нерасцепов по сравнению с базовым продольным профилем;

$P_{н(Б)}$ – вероятность появления нерасцепа вагонов для базового продольного профиля сортировочной горки, 1/состав;

$\Delta h_{\text{геом}(Б)}^{\max(+)}$ – экстремум дополнительного вертикального смещения осей автосцепок со стороны надвигной части для базовой сортировочной горки (с известным показателем вероятности появления нерасцепов вагонов $P_{н(Б)}$);

$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ – экстремум дополнительного вертикального смещения осей автосцепок со стороны надвигной части для исследуемой горки.

Приведенные в работах [1, 151] показатели по нерасцепам вагонов соответствовали среднесетевым условиям работы в период действия норм ИПСУ-78 [57], в которых был установлен единый радиус сопрягающих вертикальных кривых со стороны надвигной и спускной частей, равный 350 м. Поэтому данный вариант профиля принимается за базовый. В таблице 5.5 представлены сравнительные показатели по нерасцепам вагонов для трех ранее рассматриваемых вариантов продольного профиля горбов горок для разных значений радиусов вертикальных кривых и трех универсальных моделей вагонов.

В настоящее время сложилась следующая структура парка вагонов на сети ОАО «РЖД»: ¹ 45,4 % – полувагоны; 24,2 % – цистерны; 5,6 % – крытые вагоны; 5,4 % – платформы; 3,9 % – фитинговые платформы; 3,4 % – хопперы-зерновозы; 2,9 % – хопперы-минераловозы; 2,4 % – хопперы-ЦМВ; 0,4 % – вагоны для перевозки автомобилей; 6,4 % – прочие вагоны (в составе которых изотермические вагоны – 1 %, а также другие специализированные вагоны).

¹ По данным ГВЦ ОАО «РЖД» на 01.08.2015 г.

Таблица 5.5 – Сводная таблица расчета показателей оценки ориентировочного числа нерасцепов на горбах сортировочной горки по вариантам продольного профиля

Радиус вертикальной кривой R_c , м	Показатели для оценки числа нерасцепов на горбах сортировочной горки по вариантам продольного профиля											
	Вариант профиля № 1				Вариант профиля № 2				Вариант профиля № 3			
	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$, мм	k_H	P_H , 1/состав	n_H , нерасцепов на 1000 ваг.	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$, мм	k_H	P_H , 1/состав	n_H , нерасцепов на 1000 ваг.	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$, мм	k_H	P_H , 1/состав	n_H , нерасцепов на 1000 ваг.
Полувагон (стандартная модель с параметрами $l_6 = 8,65$ м; $l_k = 2,635$ м)												
150	82	0,500	0,16	2,25	85	0,471	0,15	2,12	57	0,719	0,23	3,24
200	67	0,612	0,20	2,76	69	0,580	0,19	2,61	49	0,837	0,27	3,77
250	55	0,745	0,24	3,36	56	0,714	0,23	3,22	45	0,911	0,29	4,11
300	47	0,872	0,28	3,93	47	0,851	0,27	3,84	43	0,953	0,31	4,30
350	41	1,000	0,32	4,51	40	1,000	0,32	4,51	41	1,000	0,32	4,51
400	37	1,108	0,35	4,99	36	1,111	0,36	5,01	40	1,025	0,33	4,62
Крытый вагон (стандартная модель с параметрами $l_6 = 10,0$ м; $l_k = 2,365$ м)												
150	77	0,519	0,17	2,34	79	0,494	0,16	2,22	56	0,714	0,23	3,22
200	65	0,615	0,20	2,77	66	0,591	0,19	2,66	50	0,800	0,26	3,61
250	53	0,755	0,24	3,40	54	0,722	0,23	3,26	45	0,889	0,28	4,01
300	46	0,870	0,28	3,92	45	0,867	0,28	3,91	42	0,952	0,30	4,29
350	40	1,000	0,32	4,51	39	1,000	0,32	4,51	40	1,000	0,32	4,51
400	36	1,111	0,36	5,01	34	1,147	0,37	5,17	39	1,026	0,33	4,62
Платформа (стандартная модель с параметрами $l_6 = 14,71$ м; $l_k = 2,45$ м)												
150	94	0,628	0,20	2,83	85	0,694	0,22	3,13	78	0,756	0,24	3,41
200	85	0,694	0,22	3,13	76	0,776	0,25	3,50	73	0,808	0,26	3,64
250	76	0,776	0,25	3,50	67	0,881	0,28	3,97	68	0,868	0,28	3,91
300	67	0,881	0,28	3,97	57	1,035	0,33	4,67	63	0,937	0,30	4,22
350	59	1,000	0,32	4,51	49	1,204	0,39	5,43	59	1,000	0,32	4,51
400	53	1,113	0,36	5,02	41	1,439	0,46	6,49	56	1,054	0,34	4,75

Таким образом, для комплексной оценки продольного профиля по показателю P_n целесообразно использовать средневзвешенный коэффициент, отражающий наибольшее число типов вагонов, перерабатываемых на горке:

$$k_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \frac{\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}(B)_i}{\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}}, \quad (5.2)$$

где α_i – доля вагонов i -того типа перерабатываемых на горке;

$\Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}(B)_i, \Delta h_{\text{геом}}^{\max(+)}$ – экстремумы дополнительного вертикального смещения для i -го типа вагонов со стороны подвижной части, соответственно, для базового варианта сортировочной горки и исследуемого.

Число нерасцепов вагонов можно определить по формуле, нерасцепов/сут:

$$n_n = k_n P_{n(B)} \frac{N_{\text{пер}}}{m_{1050(B)}} \cdot \frac{n_{o(B)}}{n_o}, \quad (5.3)$$

где $N_{\text{пер}}$ – число перерабатываемых вагонов на горке, ваг./сут;

$m_{1050(B)}$ – среднее число вагонов в составе при установленной длине поездов 1050 м, соответствующей среднесетевым условиям, ваг./сост;

$n_o, n_{o(B)}$ – средняя длина отцепа, соответственно, для исследуемой горки и среднесетевая, ваг./отцеп.

Средние потери времени на устранение последствий нерасцепов за время переработки $N_{\text{пер}}$ вагонов на горке могут быть определены по формуле:

$$t_n = n_n t_{1n}, \quad (5.4)$$

где t_{1n} – среднее время на ликвидацию одного нерасцепа, зависящее от технологии устранения последствий нерасцепов вагонов на горке, мин.

Известно, что влияние нерасцепов на горочный технологический интервал при расчете перерабатывающей способности сортировочной горки оценивается через коэффициент $\rho_{\text{гор}}$, учитывающий отказы технических устройств, нерасцепы вагонов и др. [58]. При расчете $\rho_{\text{гор}}$ использовались статистические среднесетевые данные [1, 151]. Эти же данные в формулах (5.1–5.4) были приняты за расчетные, соответствующие базовому варианту продольного профиля перевальной части горки. В результате для оценки влияния продольного профиля горба горки на го-

рочный технологический интервал $t_{\text{гн}}$ по критерию появления нерасцепов можно использовать зависимость:

$$t_{\text{гн}}(1 + \rho_{\text{гор(Б)}}) = (t_{\text{гн(Б)}} - \Delta t_{\text{гн}}^{\text{H}})(1 + \rho_{\text{гор(Б)}}), \quad (5.5)$$

где $\Delta t_{\text{гн}}^{\text{H}}$ – изменение горочного технологического интервала, вызванное изменением числа нерасцепов в результате корректировки параметров продольного профиля перевальной части, мин, определяемое по формуле:

$$\Delta t_{\text{гн}}^{\text{H}} = (P_{\text{н(Б)}} - P_{\text{н}})t_{1\text{н}}. \quad (5.6)$$

Преобразуя выражение (5.5) получим:

$$t_{\text{гн}} = t_{\text{гн(Б)}} - (P_{\text{н(Б)}} - P_{\text{н}})t_{1\text{н}}, \quad (5.7)$$

где $t_{\text{гн(Б)}}$ – величина горочного технологического интервала для базового варианта продольного профиля горки, которая может быть определена для эксплуатируемой горки статистическими методами либо по формуле (6.36) из [107, с. 138], мин.

Оценка влияния продольного профиля перевальной части на скорость роспуска и горочный технологический интервал

Динамические качества продольного профиля горба горки будут меняться из-за корректировки радиуса вертикальной кривой [91]. Соответствующее изменение горочного технологического интервала (при известном изменении времени роспуска) можно определить с использованием технологического графика работы сортировочной горки или по формуле:

$$\Delta t_{\text{гн}}^{\text{Д}} = \beta_1 (t_{\text{р(Б)}} - t_{\text{р(П)}}) - \beta_5 (k_{\text{оп(Б)}} - k_{\text{оп(П)}}), \quad (5.8)$$

где β_1, β_5 – коэффициенты регрессии, значения которых принимаются в зависимости от числа горочных локомотивов по таблице 6.32 из [107, с. 138];

$t_{\text{р(Б)}}$ и $t_{\text{р(П)}}$ – среднее время роспуска составов при существующем (базовом) профиле горба горки и при проектируемом профиле соответственно, мин/состав;

$k_{\text{оп(Б)}}$ и $k_{\text{оп(П)}}$ – коэффициент параллельности выполнения маневровых операций при существующем (базовом) профиле горба горки и, соответственно, при проектируемом профиле, определяемый по формуле 6.37 из [107, с. 139].

Среднее время роспуска состава без учета дополнительного времени на съём вагонов, запрещенных к спуску с горки без локомотива, мин, определяется по известной формуле:

$$t_p = \frac{l_c}{60v_p} \cdot \left(1 - \frac{1}{2g_0}\right), \quad (5.9)$$

где l_c – длина состава, м;

g_0 – среднее число отцепов в составе.

Скорость роспуска составов в результате изменения радиуса вертикальной кривой и, соответственно, динамических качеств продольного профиля горба горки, можно определить по формуле:

$$v_p = v_{p(Б)} \cdot \frac{l_i - x_{o,i}^{\Pi} + x_{o,i+1}^X}{l_i - x_{o,i(Б)}^{\Pi} + x_{o,i+1(Б)}^X}, \quad (5.10)$$

где v_p и $v_{p(Б)}$ – скорость роспуска составов для проектируемого профиля горба горки и при существующем (базовом) профиле соответственно, м/с;

l_i – длина i -го отцепа, м;

$x_{o,i}^{\Pi}$, $x_{o,i+1}^X$ – координаты отрыва i -го и следующего за ним отцепа для проектируемого профиля, м;

$x_{o,i(Б)}^{\Pi}$, $x_{o,i+1(Б)}^X$ – координаты отрыва i -го и следующего за ним отцепа при существующем (базовом) продольном профиле горба горки, м.

Координаты точек отрыва одновагонных отцепов, соответствующие их ходовым свойствам, могут быть определены по методике, приведенной в п. 2.1 или [88, 95, 100].

Определение влияния продольного профиля на перерабатывающую способность горки

Суммарное изменение горочного технологического интервала в результате изменения продольного профиля (в том числе выправки) горба горки составит:

$$\Delta t_{ги} = \Delta t_{ги}^H + \Delta t_{ги}^L. \quad (5.11)$$

Отсюда можно определить среднесуточное число дополнительно перерабатываемых вагонов на сортировочной горке, ваг./сут:

$$\Delta n = \left(\frac{1}{t_{\text{ги}} - \Delta t_{\text{ги}}} - \frac{1}{t_{\text{ги}}} \right) \cdot \frac{1440 \cdot \alpha_{\text{г}} - \sum T_{\text{пост}}^{\text{г}}}{(1 + \rho_{\text{гор}}) \cdot \mu_{\text{повт}}} m_{\text{с}}, \quad (5.12)$$

где $\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент, учитывающий возможные перерывы в использовании горки из-за враждебных передвижений, принимается равным 0,97;

$\sum T_{\text{пост}}^{\text{г}}$ – суммарное время занятия горки в течение суток для выполнения постоянных операций, не изменяющихся пропорционально с увеличением объема переработки, мин/сут;

$\rho_{\text{гор}}$ – коэффициент, учитывающий отказы технических устройств, нерасцепы вагонов и др., значение которого определяется по [58];

$\mu_{\text{повт}}$ – коэффициент, учитывающий повторную сортировку части вагонов в процессе окончания формирования с горки и из-за недостатка числа и длины сортировочных путей, значение которого определяется по [58], для средних условий можно принимать равным 1,05 для сортировочных систем с парками отправления и 1,12 без парков отправления;

$m_{\text{с}}$ – среднее число вагонов в расформировываемом составе, ваг.

5.6.2 Методика оценки экономического эффекта при сравнении вариантов продольного профиля перевальной части сортировочных горок

Экономический эффект $\mathcal{E}\Phi$ от реализации проекта модернизации (в том числе выправки) продольного профиля перевальной части горки определяется как разность эксплуатационных расходов при существующем положении $\sum \mathcal{E}_{\text{сущ}}$ и после модернизации (выправки) $\sum \mathcal{E}_{\text{проект}}$ с учетом расходов Z на ее проведение, р./год [94]:

$$\mathcal{E}\Phi = \sum \mathcal{E}_{\text{сущ}} - \sum \mathcal{E}_{\text{проект}} - Z/T = \sum \Delta \mathcal{E} - Z/T, \quad (5.13)$$

где Z – затраты на приведение продольного профиля к проектному очертанию, р.;

$\sum \Delta \mathcal{E}$ – экономия эксплуатационных расходов за счет модернизации (выправки) продольного профиля перевальной части горки, р./год;

T – срок полезного использования продольного профиля до последующей модернизации (выправки), лет.

К затратам Z отнесены: прямые затраты на приведение параметров нижнего и верхнего строения горочных путей перевальной части горки к проектному очертанию (оплата труда и стоимость эксплуатации машин и механизмов); приобретение и доставка необходимых материалов; накладные и прочие затраты.

Экономический эффект может включать экономию эксплуатационных расходов $\Sigma \Delta \mathcal{E}$ только для сопоставимых стоимостных показателей. В общем виде разница этих расходов рассчитывается следующим образом, р./год:

$$\Sigma \Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{пп}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{расф}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{нак}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{гл}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{ман}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{п}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{доп}}, \quad (5.14)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\text{пп}}$ – изменение затрат, связанных с простоем вагонов в парке приема;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{расф}}$ – изменение затрат, связанных с простоем вагонов в процессе расформирования;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{нак}}$ – изменение затрат, связанных с простоем вагонов под накоплением;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{гл}}, \mathcal{E}_{\text{ман}}$ – изменение затрат, связанных с содержанием и работой горочных и других маневровых локомотивов;

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

$\Delta \mathcal{E}_{\text{доп}}$ – изменение затрат, вызванное дополнительной переработкой вагонов на горке.

К настоящему времени в ОАО «РЖД» показатель стоимости одного часа простоя вагона на станции уже несколько лет исключен из экономических расчетов. Поэтому составляющие формулы (5.14) $\mathcal{E}_{\text{пп}}, \mathcal{E}_{\text{расф}}, \mathcal{E}_{\text{нак}}$ – при расчетах для станций сети ОАО «РЖД» не учитываются, однако могут быть использованы для расчетов на станциях других железнодорожных сетей (в том числе промышленных и зарубежных) или в случае возвращения показателя «вагоно-часы простоя».

Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{пп}}$, связанная с изменением простоя вагонов в предгорочном парке из-за ожидания расформирования, р./год, определяется по формуле [9]:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{пп}} = 365 \frac{\Delta t_{\text{оп}}}{60} e_{\text{ваг-ч}} m_c n_p, \quad (5.15)$$

где $\Delta t_{\text{оп}}$ – сокращение величины среднего времени ожидания расформирования, мин/состав;

$e_{\text{ваг-ч}}$ – стоимость вагоно-часа простоя на станции, р.;

m_c – среднее число вагонов в составе прибывающих поездов;

n_p – среднесуточное количество прибывающих поездов.

Среднее время ожидания расформирования зависит от степени загрузки горки и горочного технологического интервала и определяется по формуле [62]:

$$t_{\text{оп}} = \frac{K t_{\text{ги}} (1 + C_{\text{ги}}^2)}{2(1 - K)}, \quad (5.16)$$

где K – коэффициент загрузки сортировочной горки;

$t_{\text{ги}}$ – величина горочного технологического интервала, мин/состав;

$C_{\text{ги}}$ – коэффициент вариации горочного технологического интервала.

Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{расф}}$, получаемая в результате уменьшения вагоно-часов простоя подвижного состава на станции в процессе расформирования, определяется по формуле [82], р./год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{расф}} = 365 \frac{\Delta t_{\text{ги}}}{60} e_{\text{ваг-ч}} N_{\text{ваг}}, \quad (5.17)$$

где $\Delta t_{\text{ги}}$ – сокращение величины горочного технологического интервала, мин.;

$N_{\text{ваг}}$ – количество вагонов, перерабатываемых в среднем за сутки, ваг/сут.

Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{нак}}$, получаемая в результате сокращения продолжительности поступления на путь накопления замыкающей группы вагонов в составе поезда и, как следствие, уменьшения простоя вагонов под накоплением на состав, определяется по формуле [82], р./год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{нак}} = 365 \frac{\Delta t_{\text{ги}}}{60 \cdot n_{\text{отц}}} e_{\text{ваг-ч}} N_{\text{ваг}}, \quad (5.18)$$

где $n_{\text{отц}}$ – среднее количество отцепов в расформировываемых составах.

Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{гл}}$, получаемая в результате уменьшения затрат на работу горочных локомотивов за счет сокращения продолжительности расформирования составов на горке, определяется по формуле [82], р./год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{гл}} = 365 \frac{\Delta t_{\text{ги}}}{60} e_{\text{лок-ч(ман)}} n_c, \quad (5.19)$$

где $e_{\text{лок-ч(ман)}}$ – стоимость локомотиво-часа маневровой работы, р.;

n_c – среднесуточное число расформировываемых составов.

Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{ман}}$, получаемая в результате уменьшения затрат на маневровую работу за счет сокращения времени на перестановку «чужаков», определяется по формуле, р./год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ман}} = 365 \Delta n_{\text{ч}} \frac{t_{\text{ч}}}{60} e_{\text{л-ч(ман)}}, \quad (5.20)$$

где $\Delta n_{\text{ч}}$ – сокращение среднесуточного числа «чужаков», шт.;

$t_{\text{ч}}$ – среднее время перестановки «чужака» маневровым локомотивом на путь назначения, мин.

Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{п}}$, вызванная сокращением времени занятия станционных путей из-за снижения простоя транзитного вагона с переработкой в результате уменьшения горочного интервала $t_{\text{ги}}$, а также времени ожидания в парке приема $t_{\text{оп}}$, определяется по формуле, р./год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{п}} = 365 N_{\text{ваг}} \frac{(\Delta t_{\text{ги}} + \Delta t_{\text{оп}})}{60} e_{\text{км-ч}} l_{\text{ваг}} \cdot 10^{-3}, \quad (5.21)$$

где $e_{\text{км-ч}}$ – расходная ставка на 1 час занятия 1 км станционных путей, р.;

$l_{\text{ваг}}$ – средняя длина вагона, м.

В результате сокращения горочного технологического интервала возникает дополнительный экономический эффект, обусловленный ростом перерабатывающей способности горки на величину ΔN . Наличие данного резерва позволяет перераспределить сортировочную работу с наиболее загруженных объектов железнодорожной сети и не вкладывать средства в «создание дополнительной мощности» (500–800 у.е./ваг.) при увеличении сортировочной работы на сети [82]. В случае сохранения, либо снижения объемов сортировки, прирост резерва ΔN позволяет рассматривать вопрос о концентрации сортировочной работы на меньшем количестве станций и ее перераспределении для повышения эффективности функционирования железнодорожной сети. Расчет экономического эффекта в этом случае индивидуален для каждой станции и полигона железнодорожной сети, а также складывающейся оперативной обстановки в продвижении вагонопотоков, и может быть определен следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{доп}} = 365 (C_{\text{пер,ст1}} - C_{\text{пер,ст2}} \pm \Delta \mathcal{E}_{\text{пр}}) \Delta N, \quad (5.22)$$

где $C_{\text{пер,ст1}}$ – себестоимость переработки одного вагона на станции, с которой передается часть перерабатываемого вагонопотока, р./ваг.;

$C_{\text{пер,ст2}}$ – себестоимость переработки одного вагона на рассматриваемой сортировочной (горочной) станции, р./ваг.;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{пр}}$ – разница эксплуатационных расходов, связанная с дополнительным пробегом поездов по полигону сети, а также с простоем перерабатываемых вагонов на станциях, р./ваг.;

ΔN – среднесуточное число дополнительно перерабатываемых вагонов на сортировочной горке, определяемое по формуле (5.12), ваг./сут.

Срок окупаемости для одноэтапных вложений, лет:

$$T_{\text{ок}} = \frac{3}{\sum \mathcal{E}_{\text{сущ}} - \sum \mathcal{E}_{\text{проект}}} = \frac{3}{\sum \Delta \mathcal{E}}. \quad (5.23)$$

Пример расчета экономического эффекта выправки трех горбов перевальной части сортировочной горки «Н», имеющей увеличенные радиусы вертикальных кривых, по разработанной методике приведен в Приложении Б. Установлено, что в результате проведения выправки, затраты на которую составляют 247,6 тыс. р., годовая экономия эксплуатационных расходов составит 978,7 тыс. р./год, а срок окупаемости затрат составит 0,25 года. При этом, экономический эффект с учетом расходов на выправку при периодичности ее проведения 1 раз в три года составит 896,2 тыс. р./год, а при периодичности проведения 1 раз в год – 731,1 тыс. р./год.

Таким образом, при превышении радиусов вертикальных кривых нормативных значений проведение выправки горочных путей (в том числе внеплановой) для большинства сортировочных горок будет целесообразным. Полученные результаты показывают, что периодичность проведения инструментального контроля за состоянием перевальной части горок может быть установлена чаще, чем для остальных путей горки.

Пример сравнения вариантов конструкции продольного профиля перевальной части горки приведен в приложении В. Установлено, что при проектировании горбов сортировочных горок по действующим нормативам следует применять вертикальные кривые наименьших радиусов: 250 м – со стороны спускной части, 350 м – со стороны подвижной части.

Выводы по пятой главе

В данной главе разработана новая методика оценки продольного профиля перевальной части как проектируемых, так и эксплуатируемых сортировочных горок на основе имитационного моделирования процесса прохождения сцепленных вагонов через горб горки по следующим критериям:

- прохождение отцепов по перевальной части горки без самопроизвольного расцепления и сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов K_1 ;
- своевременное отделение отцепов и создание условий для уменьшения разницы интервалов следования между смежными отцепами K_2 .

Методика позволяет проводить исследование влияния различных конструкций профиля перевальных частей сортировочных горок на их эксплуатационные свойства. Результаты могут быть использованы при определении рациональной конструкции проектного продольного профиля горбов горок.

Разработанная методика позволяет оценивать продольный профиль горбов эксплуатируемых горок с учетом местных отклонений пути в условиях, когда применение аналитических методов затруднено. Это позволит производить мониторинг состояния продольного профиля горбов горок, на основании которого своевременно планировать проведение их выправки.

Разработана методика технико-экономического сравнения вариантов продольного профиля перевальной части горки, позволяющая определять рациональную конструкцию по экономическим критериям. Также можно производить оценку возможного роста перерабатывающей способности горочных станций при планировании выправки и корректировке параметров продольного профиля перевальной части эксплуатируемых сортировочных горок.

Выполнено сравнение различных вариантов продольного профиля перевальной части горки. Установлено, что при проектировании горбов горок по действующим нормативам следует применять вертикальные кривые наименьших радиусов: 250 м – со стороны спускной части, 350 м – со стороны надвигной части горки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследований, выполненных в диссертационной работе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Выполнен аналитический обзор развития норм проектирования продольного профиля перевальной части сортировочных горок. Установлено, что предельные значения параметров горбов горок определялись исходя из проходимости подвижного состава через горб горки и создания необходимых интервалов между отцепами.

2. Анализ теоретических исследований, а также проведенные натурные наблюдения за процессом прохождения отцепами перевальной части горки показали, что в настоящее время методы расчета положения отцепов в момент их отрыва от состава требуют уточнения, поскольку они не учитывают дополнительное сопротивление движению из-за усилий в автосцепках и случайный характер ветровых нагрузок. Кроме того, аналитические методы оценки прохождения сцепленных вагонов через горб горки не учитывают местные отклонения продольного профиля на эксплуатируемых горках, что может приводить к погрешностям расчета.

3. На основании натуральных наблюдений и результатов экспериментов, выполненных с использованием разработанной имитационной модели процесса отрыва отцепов от состава, обоснована целесообразность включения в горочные расчеты нового вида сопротивления – *удельного сопротивления при разъединении автосцепок вагонов* w_a . Указанное сопротивление следует учитывать до момента фактического отрыва отцепа от состава. Разработана математическая модель для определения величины w_a , основанная на рассмотрении процесса разъединения автосцепок при отделении отцепов от состава в виде трех последовательных фаз.

4. Предложена методика учета в горочных расчетах случайного характера воздействия ветра на отцепы при роспуске. Уточненный расчет ветровых нагрузок предусматривает определение пульсационной составляющей скорости ветра $v_{п}(t)$. Установлено, что диапазон рассеивания координат точек отрыва отцепов в результате воздействия порывистого ветра увеличивается с ростом его средней скорости и при экстремальных скоростях ветра может превышать 15 м.

5. Разработана имитационная модель прохождения отцепов через горб горки при роспуске, позволяющая рассчитывать вероятностные показатели проходимости сцепленных вагонов, в частности, вероятности появления саморасцепов и сверхнормативных нагрузок на автосцепные устройства. Выполнено сравнение различных вариантов конструкции продольного профиля перевальной части горки. Установлено, что при значительной разнице сопрягаемых на горбе горки уклонов наилучшим вариантом по условиям прохождения вагонов является продольный профиль с наличием разделительного элемента и радиусами вертикальных кривых, равными 250 м.

6. Для оценки влияния конструктивных параметров продольного профиля перевальной части на эксплуатационные свойства сортировочной горки разработана методика, учитывающая критерии: проходимость отцепов по перевальной части горки без самопроизвольного расцепления и сверхнормативных нагрузок на узлы вагонов; своевременность отделения отцепов и создание условий для уменьшения разницы интервалов следования между смежными отцепами. Методика обеспечивает учет местных отклонений профиля пути при анализе конструкции перевальной части эксплуатируемых горок.

7. Разработана методика технико-экономического сравнения вариантов продольного профиля перевальной части горки, позволяющая определять рациональную конструкцию по экономическим критериям. Методика позволяет производить оценку изменения перерабатывающей способности при выправке и корректировке параметров продольного профиля перевальной части с учетом обеспечения безопасности функционирования эксплуатируемых сортировочных горок.

8. Выполнено сравнение нормативных вариантов продольного профиля перевальной части горки. Установлено, что при проектировании горбов горок по действующим нормативам следует применять вертикальные кривые наименьших радиусов: 250 м – со стороны спускной части, 350 м – со стороны подвижной части горки. Для повышения перерабатывающей способности горки целесообразна корректировка существующих норм с уменьшением радиуса со стороны подвижной части до 250 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях / Ю. А. Муха, И. В. Харланович, В. П. Шейкин [и др.]. – М. : Транспорт, 1985. – 248 с.
2. Автосцепное устройство железнодорожного подвижного состава / В. В. Коломийченко [и др.]. – М. : Транспорт, 1991. – 232 с.
3. Арнольд, В. Л. Аналитическое исследование условий скатывания вагона с сортировочной горки / В. Л. Арнольд. – СПб., 1905. – 42 с.
4. А. с. 387065 СССР, МКИ Е 01 В 35/02. Способ контроля вертикальных кривых / В. Б. Андреев. – № 1214855/27-11 ; заявл. 09.01.1968 ; опубл. 21.06.1973, Бюл. № 27. – 4 с.
5. Бакалов, М. М. Определение точки отрыва отцепов при роспуске их с горки / М. М. Бакалов // Труды ДИИТа. – Вып. 43. – Днепропетровск, 1963. – С. 136–162.
6. Бевзюк, Ф. Ф. О ходовых свойствах длинных отцепов при скатывании их с горки // Вестник ВНИИЖТа. – 1963. – № 6. – С. 50–52.
7. Безопасность и надежность технических систем / Л. Н. Александровская [и др.]. – М. : Логос, 2008. – 376 с.
8. Беляев, В. И. Сцепные и автосцепные устройства железнодорожного подвижного состава / В. И. Беляев, Д. А. Ступин. – М. : Трансинфо, 2012. – 414 с.
9. Бессоненко, С. А. Теория расчета сортировочных горок для различных климатических зон : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Бессоненко Сергей Анатольевич. – М., 2011. – 418 с.
10. Бледный, А. М. Исследование отрыва восьмиосных вагонов на сортировочных горках / А. М. Бледный, Л. М. Болвановская, В. И. Кривенкин // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках. – Днепропетровск, 1986. – С. 64–71.

11. Бобровский, В. И. Оценка эффективности систем автоматизации сортировочного процесса методом моделирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Бобровский Владимир Ильич. – Днепропетровск, 1973. – 38 с.
12. Бобровский, В. И. Моделирование процесса скатывания отцепов с сортировочной горки / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко // Сб. науч. тр. ГЭТУТ. Серия «Транспортные системы и технологии». – Вып. 16. – Киев : ГЭТУТ, 2010. – С. 20–29.
13. Болотный, В. Я. Совершенствование схем и технологии работы железнодорожных станций / В. Я. Болотный. – М. : Транспорт, 1986. – 280 с.
14. Бондаренко, И. С. Оптимизация технических параметров сортировочных устройств / И. С. Бондаренко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 2(34). – С. 129–132.
15. Брехов, Н. И. О скатывании длинных отцепов на сортировочных горках / Н. И. Брехов // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск, 1985. – С. 67–71.
16. Бузанов, С. П. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных устройств / С. П. Бузанов, А. М. Карпов, М. А. Рыцарев. – М. : Транспорт, 1965. – 232 с.
17. Бузанов, С. П. Проектирование сортировочных горок и полугорок и их устройство / С. П. Бузанов, А. М. Карпов. – М. : Трансжелдориздат, 1954. – 240 с.
18. Буянова, В. К. Моделирование на ЭЦВМ процесса роспуска вагонов с сортировочной горки / В. К. Буянова // Вестник ВНИИЖТа. – 1965. – № 6. – С. 60–64.
19. Быкадоров, А. В. Графический способ расчета энергетических высот для отцепов из нескольких вагонов / А. В. Быкадоров // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций : тр. Новосиб. ин-та инженеров ж.-д. трансп. – Новосибирск, 1965. – Вып. 45. – С. 118–130.
20. Быкадоров, А. В. Некоторые особенности скатывания отцепов из нескольких вагонов / А. В. Быкадоров // Вопросы эксплуатации железных дорог : тр.

Новосиб. ин-та инженеров ж.-д. трансп. – Новосибирск, 1959. – Вып. 20. – С. 150–157.

21. Быкадоров, А. В. Расчет пункта отрыва отцепов от состава на сортировочных горках / А. В. Быкадоров // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций : тр. Новосиб. ин-та инженеров ж.-д. трансп. – Новосибирск, 1967. – Вып. 65. – С. 28–35.

22. Быкадоров, А. В. Расчетные отцепы при переменной скорости роспуска составов на горках / А. В. Быкадоров // Вопросы равномерной работы железных дорог : тр. Новосиб. ин-та инженеров ж.-д. трансп. – Новосибирск, 1961. – Вып. 25. – С. 191–204.

23. Быкадоров, А. В. Скатывание отцепов из нескольких вагонов на механизированных и автоматизированных горках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Быкадоров Александр Васильевич. – М., 1963. – 21 с.

24. Виноградов, Г. П. Выбор параметров и конструктивных схем грузовых вагонов / Г. П. Виноградов, Л. А. Коган, И. М. Трещалин // Труды ВНИИЖТа. – Вып. 189. – М. : Трансжелдориздат, 1960. – 191 с.

25. Гибшман, Е. А. Об устройстве пассажирских и сортировочных станций : учеб. пособие для втузов / Е. А. Гибшман. – М. : Транспечать НКПС, 1929. – 273 с.

26. ГОСТ 21447–75. Контур зацепления автосцепки. Размеры. – Введ. 1976–07–01 / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 2 с.

27. ГОСТ 32700–2014. Железнодорожный подвижной состав. Методы контроля сцепляемости : межгосударственный стандарт. – Введ. 2015–06–01 / ОАО «Научно-исслед. ин-т ж.-д. трансп.». – М. : Стандартинформ, 2015. – 5 с.

28. ГОСТ 32885–2014. Автосцепка модели СА-3. Конструкция и размеры : межгосударственный стандарт. – Введ. 2015–06–01 / ОАО «Научно-исслед. ин-т ж.-д. трансп.». – М. : Стандартинформ, 2015. – 27 с.

29. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам : межгосударственный стандарт. – Введ. 2016–07–01 / ОАО «Научно-исслед. ин-т ж.-д. трансп.». – М. : Стандартиформ, 2016. – 54 с.
30. ГОСТ 3475–81. Устройство автосцепное подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Установочные размеры. – Введ. 1982–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 4 с.
31. ГОСТ Р 54749–2011. Устройство сцепное и автосцепное железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки. – Введ. 2012–07–01 / ОАО «Научно-исслед. ин-т ж.-д. трансп.». – М. : Стандартиформ, 2012. – 12 с.
32. Гурский, Е. П. Оценка технического состояния автосцепного устройства в эксплуатации / Е. П. Гурский. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 28 с.
33. Грау, Б. Проектирование железнодорожных станций / Б. Грау ; сокр. пер. с нем. В. И. Шейко ; ред. В. Я. Болотный. – М. : Транспорт, 1978. – 487 с.
34. Дашков, М. Г. Анализ норм проектирования сортировочных горок и условий пропуска по их профилю вагонов с увеличенной базой / М. Г. Дашков // Совершенствование управления перевозками на железных дорогах Урала и Сибири : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1986. – С. 14–27.
35. Дашков, М. Г. Влияние профиля перевальной части сортировочной горки на условия погрузки длинномерных грузов на сцеп из трех платформ / М. Г. Дашков // Вопросы проектирования и организации работы станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1982. – С. 29–37.
36. Дашков, М. Г. Вопросы проектирования и выправки профиля сортировочных горок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Михаил Григорьевич Дашков. – Л., 1980. – 18 с.
37. Дашков, М. Г. Исследование влияния величины радиуса вертикальной кривой на перевальной части и уклона скоростного участка горки на ее динамиче-

ские качества / М. Г. Дашков, И. Н. Матвеева // Проектирование и совершенствование работы станций и узлов Сибири. – Новосибирск, 1991. – С. 50–64.

38. Дашков, М. Г. К вопросу определения минимальной длины первого элемента скоростного участка горки / М. Г. Дашков // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1979. – Вып. 201/14. – С. 23–34.

39. Дашков, М. Г. К вопросу проектирования ступенчатого профиля спускной части сортировочной горки / М. Г. Дашков // Повышение эффективности эксплуатационной работы железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1987. – С. 57–64.

40. Дашков, М. Г. О возможности увеличения максимального значения уклона скоростного участка сортировочной горки / М. Г. Дашков // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск : Днепропетр. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1981. – Вып. 216/14. – С. 76–83.

41. Дашков, М. Г. О периодичности выправки профиля путей сортировочных горок / М. Г. Дашков // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1985. – С. 53–59.

42. Дашков, М. Г. О проектировании продольного профиля горба сортировочной горки / М. Г. Дашков // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1985. – С. 59–66.

43. Дашков, М. Г. Определение высоты подкладок при перевозке длинномерных грузов на сцепе с опорой на одну платформу / М. Г. Дашков // Обеспечение сохранности грузов и рациональное использование вагонов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1982. – С. 86–92.

44. Дашков, М. Г. Определение допустимых искажений профиля горба сортировочной горки / М. Г. Дашков // Вопросы проектирования и организации

работы железнодорожных станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1979. – Вып. 201/14. – С. 10–21.

45. Дашков, М. Г. Проектирование и содержание профиля горба сортировочной горки / М. Г. Дашков, А. М. Макуха // Проблемы наращивания мощности станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – М. : Моск. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1985. – Вып. 765. – С. 53–54.

46. Дашков, М. Г. Профиль сортировочной горки и условия погрузки длинномерных грузов на сцеп с опорой на два смежных вагона / М. Г. Дашков // Вопросы проектирования и организации работы станций и узлов : межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск : Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1982. – С. 19–28.

47. Долаберидзе, А. М. Способ увеличения скорости роспуска / А. М. Долаберидзе, А. И. Евтухов, М. А. Толстошей // Железнодорожный транспорт. – 1985. – № 5. – С. 60–61.

48. Дубелир, Г. Д. О проектировании горок для сортировочных станций / Г. Д. Дубелир. – СПб. : [б. и.], 1910. – 9 с.

49. Дуканич, Г. И. Осмотр вагонов / Г. И. Дуканич, Н. К. Костенко, Н. И. Скорина. – М. : Транспорт, 1990. – 159 с.

50. Железнодорожные станции и узлы. Расчеты и проектирование сортировочных горок : учеб. пособие / В. Д. Никитин, И. Е. Савченко, Е. А. Ветухов, В. К. Ивашкевич. – М. : ВЗИИТ, 1970. – 79 с.

51. Евстафьев, Б. С. Исследование возможности прохода восьмиосными полувагонами сортировочных горок и кривых участков пути малого радиуса / Б. С. Евстафьев // Выбор оптимальных параметров восьмиосных грузовых вагонов, исследование их прочности и динамических качеств : сб. науч. тр. МИИТ. – Вып. 153. – М. : [б. и.], 1962. – С. 93–108.

52. Евстафьев, Б. С. Исследование прохода восьмиосными вагонами кривых участков пути и условий их сцепления / Б. С. Евстафьев // Вопросы вагоностроения и вагонного хозяйства : сб. науч. тр. МИИТ. – Вып. 185. – М. : [б. и.], 1964. – С. 38–48.

53. Запорожец, Г. И. К вопросу о повышении перерабатывающей способности горок / Г. И. Запорожец // Техника железных дорог. – 1955. – № 6. – С. 23–27.
54. Земблинов, С. В. Станции и узлы / С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – М. : Трансжелдориздат, 1963. – 348 с.
55. Иванков, А. Н. Оценка дальности точек отрыва одновагонных отцепов на сортировочных горках большой и средней мощности / А. Н. Иванков, Л. Н. Иванкова, И. С. Бондаренко // Проблемы разработки ресурсосберегающих технологий в эксплуатации железных дорог: сб. науч. тр. [Каф. «Упр. эксплуатац. работой» РГОТУПС]. – Вып. 6. – М. : УОП РГОТУПС, 2006. – С. 100–103.
56. Иванькова, Л. Н. Влияние основных параметров профиля надвижной и спускной частей сортировочной горки на перерабатывающую способность / Л. Н. Иванькова, И. С. Бондаренко // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 4. – С. 42–46.
57. Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР : ВСН 56–78. – Введ. 1979–01–01 / Минтрансстрой СССР, МПС СССР. – М. : Транспорт, 1978. – 175 с.
58. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог : утв. ОАО «РЖД» 10.11.10. – М. : Техинформ, 2011. – 289 с.
59. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути [Электронный ресурс] : утв. распоряжением ОАО «РЖД» 29.12.12 №2791р : в ред. распоряжения 19.12.14 № 3036р. Режим доступа: <http://www.tdesant.ru/info/item/16>.
60. Кантор, В. Б. Устройство, содержание и ремонт железнодорожного пути / В. Б. Кантор. – М. : «Транспорт», 1974. – 456 с.
61. Каракашьян, З. О. Теория работы механизмов автосцепок типа СА-3 / З. О. Каракашьян. – М. : Трансжелдориздат, 1957. – 167 с.
62. Карасев, С. В. Влияние конструкции горки, структуры вагонопотока и внешней среды на качество заполнения путей сортировочного парка : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Карасев Сергей Владимирович. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2003. – 203 с.

63. Карасев, С. В. Программа для расчета параметров сортировочных горок «Спуск-2» / С. В. Карасев, Д. В. Осипов // Телеграф отраслевого фонда алгоритмов и программ «Инновации в науке и образовании». – М.: Изд-во ФГНУ «ГосКоорЦентр» – 2007. – № 3(26). – С. 2.
64. Карейша, С. Д. Железнодорожные станции / С. Д. Карейша. – М. : Транспечать НКПС, 1930. – 305 с.
65. Климов, А. А. Совершенствование сортировочных устройств, специализированных для порожних вагонов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Климов Александр Александрович. – Новосибирск, 2001. – 24 с.
66. Климов, А. А. Моделирование проходимости вагонов без саморасцепа по перевальной части сортировочной горки / А. А. Климов, Д. В. Осипов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – №3(47). – С. 154–160.
67. Кукушина, Н. А. Разработка методики и расчет условий прохождения сочлененными платформами сортировочных горок и кривых участков пути / Н. А. Кукушина // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 2(45). – С. 71–75.
68. Лапицкий, Х. М. Соппротивление среды при скатывании вагонов с сортировочной горки / Х. М. Лапицкий // Транспортное строительство. – 1967. – № 4. – С. 41–42.
69. Лоу, А. М. Имитационное моделирование / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. – 3-е изд. – СПб. : ГПП Печ. Двор, 2004. – 846 с.
70. Максимов, В. Н. Силы, действующие на вагон на сортировочных горках / В. Н. Максимов // Вестник ВНИИЖТа. – 1963. – № 4. – С. 36–40.
71. Мацкель, С. С. Проектирование продольного профиля сортировочных станций с помощью математического моделирования маневровых процессов на ЭЦВМ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 434 / Мацкель Станислав Станиславович. – М., 1968. – 23 с.
72. Методические указания по подъему горбов сортировочных горок для работы в зимних условиях. – М. : МПС, 1969. – 35 с.

73. Механизация сортировочных горок: проблемы механизации сортировочных горок и опыт постройки первой механизированной горки в СССР / ред. И. А. Грач, Л. А. Мамендос. – М. : Изд. Редбюро Локомотивпроекта, 1935. – 336 с.

74. Механизированные сортировочные горки / под ред. А. А. Смольянинова // Труды Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – Вып. 32. – М. : Трансжелдориздат, 1937. – 204 с.

75. Муха, Ю. А. Алгоритмы и библиотека программ для моделирования на ЭВМ «Наири-К» сортировочного процесса на горках / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 194/11. – Днепропетровск : ДИИТ, 1977. – С. 53–102.

76. Муха, Ю. А. Динамика скатывания отцепов с горки и проблема оценки их ходовых свойств / Ю. А. Муха, А. И. Павловский // Труды ДИИТа. – Вып. 216/14. – Днепропетровск, 1981. – С. 37–47.

77. Муха, Ю. А. Имитационное моделирование процесса скатывания отцепов при выполнении горочных расчетов / Ю. А. Муха, А. А. Муратов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск : ДИИТ, 1990. – С. 11–20.

78. Муха, Ю. А. Моделирование на ЭЦВМ процесса скатывания отцепов с сортировочной горки / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 90/6. – Днепропетровск, 1969. – С. 53–63.

79. Муха, Ю. А. Описание процесса скатывания отцепов с горки при помощи метода планирования эксперимента / Ю. А. Муха // Труды ДИИТа. – Вып. 168/9. – Днепропетровск, 1975. – С. 3–19.

80. Муха, Ю. А. Построение кривых скорости скатывания длинных отцепов с сортировочной горки и сравнение этих кривых с опытными / Ю. А. Муха // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Вып. 41. – Днепропетровск, 1962. – С. 53–85.

81. Муха, Ю. А. Цифровая модель процесса роспуска составов на автоматизированных сортировочных горках / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский, С. А. Попов // Труды ДИИТа. – Вып. 181/10. – Днепропетровск, 1976. С. 23–40.

82. Негрей, В. Я. Обоснование уровня технического оснащения и оптимизация параметров конструкции сортировочных комплексов железнодорожных станций / В. Я. Негрей, С. А. Пожидаев, Е. А. Филатов // Транспортные системы и технологии перевозок. – 2014. – № 8. – С. 110–119.

83. Новиков, И. Н. Анализ работы механизма автосцепки / И. Н. Новиков, С. П. Бялынович // Труды ВНИИ ж.-д. трансп. – Вып. 61. – М. : Трансжелдориздат, 1952. – 96 с.

84. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) : с изменениями и дополнениями № 1 (с 01.02.2000), № 2 (с 01.03.02), № 3 (с 01.03.04). – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996. – 318 с.

85. Осипов, В. Т. Эксплуатация железных дорог за рубежом / В. Т. Осипов. – М. : Наука, 1976. – 312 с.

86. Осипов, Д. В. Анализ развития методов расчета положений точек отрыва отцепов от состава / Д. В. Осипов // Совершенствование технологии перевозочного процесса: сб. науч. тр. / Сиб. гос. ун-т путей сообщ. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015. – С. 99–105.

87. Осипов, Д. В. Анализ развития норм проектирования продольного профиля перевальной части сортировочной горки / Д. В. Осипов // Интеграция науки, общества, производства и промышленности: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 138–142.

88. Осипов, Д. В. Аналитический метод расчета положения одновагонных отцепов на перевальной части сортировочных горок в момент их отрыва от состава / Д. В. Осипов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 9–13.

89. Осипов, Д. В. Влияние метеорологических условий на отрыв отцепов от состава на перевальной части сортировочной горки / Д. В. Осипов // Модернизация процессов перевозок, систем автоматизации и телекоммуникаций на транс-

порте : материалы Межрегиональной науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. – Том 1. – С. 93–98.

90. Осипов, Д. В. Влияние искажений продольного профиля перевальной части сортировочной горки на проход отцепов без саморасцепа / Д. В. Осипов // Современная наука: теоретический и практический взгляд: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: АЭТЕРНА, 2015. – Ч.1. – С. 32–36.

91. Осипов, Д. В. Влияние продольного профиля перевальной части сортировочной горки на перерабатывающую способность / Д. В. Осипов, А. А. Климов // Транспорт Урала. – 2016. – №4(51). – С. 71–76.

92. Осипов, Д. В. К вопросу об условии отрыва одновагонных отцепов на перевальной части сортировочной горки / Д. В. Осипов // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию Сиб. гос. ун-т путей сообщ. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2013. – Ч. 1. – С. 380–386.

93. Осипов, Д. В. Методика оценки качества продольного профиля перевальной части сортировочной горки / Д. В. Осипов, А. А. Климов // Транспорт Урала. – 2015. – № 4(47). – С. 63–68.

94. Осипов, Д. В. Методика оценки экономического эффекта при сравнении вариантов продольного профиля перевальной части горок / Д. В. Осипов // Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке: тезисы IX Междунар. науч.-техн. конф. «Политранспортные системы». – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2016. – С. 34–37.

95. Осипов, Д. В. Метод расчета координат точек отрыва одновагонных отцепов на перевальной части сортировочных горок / Д. В. Осипов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 3. – С. 62–66.

96. Осипов, Д. В. Методы контроля радиусов вертикальных кривых на перевальной части сортировочной горки / Д. В. Осипов // Научные открытия в эпоху глобализации : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : РИО МЦИИ «Омега сайнс», 2016. – Ч. 2. – С. 60–64.

97. Осипов, Д. В. Моделирование проходимости вагонов без саморасцепа по перевальной части сортировочной горки / А. А. Климов, Д. В. Осипов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – №3(47). – С. 154–160.

98. Осипов, Д. В. Особенности расчета удельных сил сопротивления движению отцепа при имитационном моделировании процесса расформирования составов / Д. В. Осипов, А. А. Климов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Одесса : Черноморье, 2010. – Том 1. – С. 69–75.

99. Осипов, Д. В. Программа для оценки качества продольного профиля горочных путей «Горб горки – Проверка профиля» [Электронный ресурс] / Д. В. Осипов, А. А. Климов // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов наука и образование. – 2015. – № 12(79). – С. 119. Режим доступа: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2015/12.doc>.

100. Осипов, Д. В. Уточнение методики расчета сортировочных горок в части определения точек отрыва отцепов от состава / Д. В. Осипов // Наука и современность : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : РИО МЦИИ «Омега сайнс», 2014. – С. 40–44.

101. Осипов, Д. В. Экспериментальное исследование процесса отрыва отцепов на перевальной части сортировочных горок Западно-Сибирской железной дороги / Д. В. Осипов // Политранспортные системы : материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. – С. 476–484.

102. Павловский, А. И. Исследование и оценка сопротивлений движению вагонов на сортировочных горках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Павловский Александр Иванович ; ВНИИ ж.-д. трансп. – М., 1989. – 24 с.

103. Петерс, П. Современные сортировочные устройства на государственных железных дорогах ФРГ / П. Петерс, П. Дебушевич // Железные дороги мира. – 1991. – № 3. – С. 10–14.

104. Подобед, В. А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны / В. А. Подобед // Вестник МГТУ : тр. Мурманского гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 9. – № 2. – С. 318–331.

105. Подобед, В. А. Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках: дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.19 / Подобед Виталий Александрович. – Мурманск, 2006. – 357 с.

106. Полякова, Л. С. Метеорология и климатология / Л. С. Полякова, Д. В. Кашарин. – Новочеркасск : НГМА, 2004. – 107 с.

107. Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин, Ю. А. Муха [и др.]. – М. : Транспорт, 1994. – 220 с.

108. Пособие работникам сортировочных горок / В. А. Король, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин [и др.]. – М. : Транспорт, 1988. – 221 с.

109. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР : ВСН 207–89 / МПС СССР. – М. : Транспорт, 1992. – 104 с.

110. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм : утв. МПС РФ 10.10.03. – М. : Техинформ, 2003. – 168 с.

111. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России 21.12.10 № 286. – М. : ТРАНСИНФО ЛТД, 2016. – 287 с.

112. Пугачевский, Ф. В. Механизированные сортировочные горки и их расчет : учеб. пособие для втузов ж.-д. трансп. / Ф. В. Пугачевский. – М. : Госжелдориздат, 1933. – 135 с.

113. Рогинский, Н. О. Механизация сортировочных горок : учеб. пособие для вузов / Н. О. Рогинский, Б. А. Родимов, Г. И. Зубрилин. – М. : [б. и.], 1949. – 248 с.

114. Родимов, Б. А. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных горок / Б. А. Родимов, В. Е. Павлов, В. Д. Прокинова. – М. : Транспорт, 1980. – 97 с.

115. Савицкий, Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – М. : [б. и.], 1972. – 111 с.

116. Савченко, И. Е. Железнодорожные станции и узлы : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / И. Е. Савченко, С. В. Земблинов, И. И. Страковский ; ред. В. М. Акулиничев, Н. Н. Шабалин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1967. – 464 с.

117. Смирнов, В. И. Динамика скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки / В. И. Смирнов // Транспорт: наука, техника, управление. – 1994. – № 1. – С. 17–23.

118. Смирнов, В. И. К вопросу обеспечения прохода отцепов через горб сортировочной горки без саморасцепа / В. И. Смирнов // Совершенствование и автоматизация процессов управления перевозками на железнодорожном транспорте : сб. науч. тр. – Спб., 1998. – С. 86–95.

119. Смольянинов, А. А. Сортировочные горки / А. А. Смольянинов. – М. : Трансжелдориздат, 1938. – 112 с.

120. Сопrotивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок : тр. ЦНИИ МПС / ред. Е. А. Сотников. – Вып. 545. – М. : Транспорт, 1975. – 102 с.

121. Сортировочные станции зарубежных железных дорог / В. Д. Никитин, А. Л. Мельник, М. Л. Забелло [и др.]. – М. : [б. и.], 1957. – 175 с.

122. Сортировочные станции, их устройство, оборудование и обслуживание / пер. с нем. С. Д. Карейша. – СПб. : Тип. МПС, 1901. – 62 с.

123. Сотников, Е. А. Железные дороги мира из XIX в XXI век / Е. А. Сотников. – М. : Транспорт, 1993. – 200 с.

124. Сотников, Е. А. История развития системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте (отечественный и зарубежный опыт) / Е. А. Сотников, Д. Ю. Левин, Г. А. Алексеев. – М. : Техинформ, 2007. – 237 с.

125. СП 225.1326000.2014. Станционные здания, сооружения и устройства : утв. Минтранс РФ 02.12.2014 г. – М., 2015. – 135 с.

126. Станции и узлы : учеб. для трансп. вузов / В. Н. Образцов [и др.] ; ред. В. И. Образцов. – М. : Трансжелдориздат, 1949. – 540 с.

127. Сцепляемость и проходимость вагонов в кривых малого радиуса и по горкам / ред. Ю. А. Хапилов // Труды ВНИИ ж.-д. трансп. – Вып. 440. – М. : Транспорт, 1971. – 96 с.

128. Таничева, Н. А. Выбор конструктивных решений сочлененных грузовых вагонов-платформ : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Таничева Наталия Андреевна. – СПб. : ПГУПС, 2013. – 141 с.

129. Технические указания на проектирование станций и узлов : утв. МПС СССР 24.11.1947 / ВНИИ ж.-д. трансп. – М. : Трансжелдориздат, 1948. – 124 с.

130. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах нормальной колеи : утв. 28.10.1953 / МПС СССР. – М. : Трансжелдориздат, 1954. – 120 с.

131. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР : ВСН 56-61 : утв. МПС СССР 12.06.1961 г. – М. : Трансжелдориздат, 1961. – 151 с.

132. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР : изменения и дополнения № 1 : ВСН 56-65 : утв. МПС СССР 30.07.1965 г. – М. : Оргтрансстрой, 1965. – 26 с.

133. Технические условия проектирования станций для дорог нормальной колеи. М. : Госжелдориздат, 1933. – 128 с.

134. Технические условия размещения и крепления грузов : Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) от 01.07.2015. – М., 2015. – 712 с.

135. Технически обоснованные нормы времени на работы по текущему содержанию пути : в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 05.08.2015 № 1976р) [Электронный ресурс] / ОАО «РЖД». – М., 2015. Режим доступа: <http://www.tdesant.ru/info/item/103>.

136. Тишков, Л. Б. К установлению теоретических основ и исходных данных прогнозного расчета значений скорости роспуска состава на автоматизированных горках / Л. Б. Тишков // Вестник ВНИИЖТа. – 2000. – № 2. – С. 11–14.

137. Тишков, Л. Б. Повышение сохранности вагонов на сортировочных станциях / Л. Б. Тишков, В. М. Рудановский, В. П. Шейкин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 1983. – № 12. – С. 7–13.

138. Тишков, Л. Б. Теоретические и методологические основы корректировки алгоритмов расчета высоты, продольного профиля сортировочных горок и систем управления расформированием составов / Л. Б. Тишков // Вестник ВНИИЖТа. – 1996. – № 6. – С. 22–25.

139. Туранов, Х. Т. Новая методика расчета времени и скорости скатывания вагона на первом скоростном участке сортировочной горки / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Бюллетень транспортной информации. – 2015. – № 8(242). – С. 27–32.

140. Туранов Х. Т. Пример вычислений времени движения и скорости вагона в стрелочной зоне сортировочной горки при воздействии попутного ветра / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, Л. А. Рыкова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 5. – С. 39–45.

141. Туранов, Х. Т. Пример расчета времени движения и скорости вагона на промежуточном участке сортировочной горки при воздействии встречного ветра / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 3. – С. 23–28.

142. Федотов, Н. И. Распределение сопротивлений движению вагонов на сортировочных горках / Н. И. Федотов // Повышение эффективности эксплуатационной работы железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Новосибирск, 1987. – С. 72–83.

143. Федотов, Н. И. Расчет моментов отрыва отцепов от составов на сортировочной горке / Н. И. Федотов, А. Н. Александров // Вопросы проектирования и организации работы железнодорожных станций и узлов : сб. науч. тр. Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Вып. 174. – Новосибирск, 1976. – С. 74–80.

144. Фролов, А. Н. Сборник статей, касающихся станций и маневров / А. Н. Фролов. – Саратов : Тип. Саратов. отд. Техн. о-ва, 1906. – 143 с.

145. Хапилов, Ю. А. Силовое взаимодействие вагонов на горке / Ю. А. Хапилов, И. Г. Бородуля // Вестник ВНИИЖТа. – 1975. – № 2. – С. 29–33.
146. Шабельников, А. Н. Теория разработки и техническая реализация многофункциональной системы автоматизации процессов расформирования поездов : монография / А. Н. Шабельников, В. Н. Иванченко. – Ростов н/Д : РГУПС, 2012. – 415 с.
147. Шавкин, Г. Б. Сортировочные станции железных дорог США / Г. Б. Шавкин. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 88 с.
148. Шавкин, Г. Б. Схемы и оснащение сортировочных станций железных дорог США и Западной Европы / Г. Б. Шавкин; ред. К. К. Тихонов. – М. : [б. и.], 1960. – 64 с.
149. Шафит, Е. М. Дифференциальные уравнения скатывания отцепов с сортировочной горки при различных способах аппроксимации продольного профиля / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Вып. 52. – М. : Транспорт, 1965. – С. 55–72.
150. Шафит, Е. М. Машинное решение дифференциальных уравнений скатывания отцепов с сортировочной горки / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Вып. 52. – М. : Транспорт, 1965. – С. 73–95.
151. Шейкин, В. П. Эксплуатация механизированных сортировочных горок / В. П. Шейкин. – М. : Транспорт, 1992. – 240 с.
152. Шмаль, С. Н. Методы совершенствования расчета параметров горочных сортировочных устройств : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Шмаль Сергей Николаевич. – М.: МИИТ, 2015. – 21 с.
153. Commission Regulation (EU) № 1299/2014 of 18 November 2014 on the technical specifications for interoperability relating to the ‘infrastructure’ subsystem of the rail system in the European Union. – ERA, 2014. – 109 p. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/1299/oj>.

154. Infrastructure Standards: ARTC Extranet. Sub-section Track and Civil. Section 5 – Track Geometry. Version Number 2.9. – Australian Rail Track Corporation, 2016. – 22 p.

155. Kube, K. Modernization of Marshalling Yards in North America / K. Kube // Progressive Railroading, 2002. – № 7. – P. 50–52.

156. Kutz, M. Handbook of transportation engineering / M. Kutz. – Boston : McGraw-Hill Professional, 2004. – 937 p.

157. Prokop, J. Design of Hump Profile in Railroad Classification Yard / J. Prokop, Sh. Myojin // Memoirs of the Faculty of Engineering. – Okayama : Okayama University, 1993. – Vol. 27. – No. 2. – P. 41–58.

158. Ribeill, G. Exploitation: du triage par gravite a l'attelage automatique (2de partie) / G. Ribeill // La Vie du Rail. – 2015. – № 3529. – P. 13–25.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты моделирования прохода сцепленных вагонов различных моделей через горб сортировочной горки

Таблица А.1 – Показатели прохода сцепленных вагонов через горб сортировочной горки

Модель вагона	Показатели прохода сцепленных вагонов через горб сортировочной горки по вариантам продольного профиля														
	Вариант профиля № 1					Вариант профиля № 2					Вариант профиля № 3				
	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$, мм	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$, мм	$\sum P_c^{\text{min}}$ $\times 10^2$	$\sum P_c^{\text{max}}$ $\times 10^2$	$\sum P_H$ $\times 10^2$	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$, мм	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$, мм	$\sum P_c^{\text{min}}$ $\times 10^2$	$\sum P_c^{\text{max}}$ $\times 10^2$	$\sum P_H$ $\times 10^2$	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{max}(+)}$, мм	$\Delta h_{\text{геом}}^{\text{min}(-)}$, мм	$\sum P_c^{\text{min}}$ $\times 10^2$	$\sum P_c^{\text{max}}$ $\times 10^2$	$\sum P_H$ $\times 10^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$R_H = 350 \text{ м}, R_C = 150 \text{ м}$															
Полувагон ¹	82	-86	0	0,350	0,134	85	-87	0	0,416	0,212	57	-77	0	0,093	0
Крытый ²	77	-81	0	0,216	0,014	79	-82	0	0,248	0,029	56	-74	0	0,068	0
Платформа ³	94	-98	0,010	1,008	0,917	85	-98	0,002	0,777	0,643	78	-92	0	0,451	0,280
Крытый для автомобилей ⁴	150	-154	0,240	30,44	0,064	125	-155	0,160	22,06	0,084	131	-148	0,075	18,85	0
Крытый для легковесных ⁵	161	-165	0,659	44,64	0,647	131	-166	0,416	32,51	0,452	141	-158	0,237	28,98	0,154
Крытый «ракетовоз» ⁶	160	-164	0,606	43,27	0,570	131	-165	0,384	31,61	0,404	140	-157	0,214	27,85	0,129
Платформа ⁷	153	-158	0,343	34,78	0,200	125	-159	0,232	25,166	0,182	136	-151	0,110	22,28	0,014
$R_H = 350 \text{ м}, R_C = 200 \text{ м}$															
Полувагон ¹	67	-71	0	0,074	0	69	-71	0	0,082	0	49	-66	0	0,025	0
Крытый ²	65	-68	0	0,054	0	66	-69	0	0,061	0	50	-64	0	0,019	0
Платформа ³	85	-88	0	0,438	0,237	76	-88	0	0,327	0,154	73	-84	0	0,229	0,064

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Крытый для автомобилей ⁴	139	-143	0,053	18,91	0	114	-143	0,037	12,70	0	125	-137	0,007	11,79	0
Крытый для легковесных ⁵	149	-153	0,216	29,27	0,046	120	-153	0,131	19,71	0,046	135	-148	0,075	20,10	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	148	-152	0,194	28,11	0,029	120	-152	0,118	19,01	0,029	133	-146	0,061	19,31	0
Платформа ⁷	143	-147	0,103	22,73	0	115	-147	0,066	15,07	0	130	-142	0,031	15,31	0
$R_H = 350 \text{ м}, R_C = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	55	-58	0	0,012	0	56	-58	0	0,013	0	45	-56	0	0,005	0
Крытый ²	53	-56	0	0,007	0	54	-56	0	0,008	0	45	-55	0	0,004	0
Платформа ³	76	-78	0	0,174	0	67	-78	0	0,124	0	68	-75	0	0,102	0
Крытый для автомобилей ⁴	128	-130	0	10,06	0	103	-130	0	6,29	0	118	-127	0	7,05	0
Крытый для легковесных ⁵	138	-141	0,036	17,56	0	109	-141	0,025	11,15	0	128	-137	0,007	12,53	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	136	-138	0,015	15,48	0	108	-138	0,011	9,67	0	126	-135	0,001	11,23	0
Платформа ⁷	133	-135	0,001	13,25	0	105	-135	0,001	8,19	0	124	-132	0	9,70	0
$R_H = 350 \text{ м}, R_C = 275 \text{ м}$															
Полувагон ¹	50	-52	0	0,001	0	50	-52	0	0,001	0	44	-52	0	0,001	0
Крытый ²	49	-51	0	0,001	0	49	-51	0	0,001	0	43	-51	0	0,001	0
Платформа ³	71	-73	0	0,102	0	62	-73	0	0,071	0	65	-71	0	0,067	0
Крытый для автомобилей ⁴	122	-124	0	7,04	0	97	-124	0	4,33	0	115	-121	0	5,20	0
Крытый для легковесных ⁵	132	-134	0	12,56	0	103	-134	0	7,67	0	125	-132	0	9,93	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Крытый «ракетовоз» ⁶	130	-132	0	11,26	0	103	-132	0	6,95	0	122	-129	0	8,34	0
Платформа ⁷	128	-129	0	9,76	0	99	-129	0	5,76	0	121	-127	0	7,58	0
$R_H = 350 \text{ м}, R_C = 300 \text{ м}$															
Полувагон ¹	47	-48	0	0	0	47	-48	0	0	0	43	-48	0	0	0
Крытый ²	46	-47	0	0	0	45	-47	0	0	0	42	-47	0	0	0
Платформа ³	67	-68	0	0,061	0	57	-68	0	0,038	0	63	-67	0	0,045	0
Крытый для автомобилей ⁴	116	-117	0	4,63	0	91	-117	0	2,74	0	114	-116	0	4,19	0
Крытый для легковесных ⁵	127	-128	0	9,22	0	98	-128	0	5,42	0	122	-126	0	7,52	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	124	-125	0	7,71	0	97	-125	0	4,57	0	119	-123	0	6,25	0
Платформа ⁷	123	-124	0	7,25	0	94	-124	0	4,21	0	118	-122	0	5,86	0
$R_H = 350 \text{ м}, R_C = 350 \text{ м}$															
Полувагон ¹	41	-41	0	0	0	40	-41	0	0	0	41	-41	0	0	0
Крытый ²	40	-40	0	0	0	39	-40	0	0	0	40	-40	0	0	0
Платформа ³	59	-59	0	0,018	0	49	-59	0	0,009	0	59	-59	0	0,018	0
Крытый для автомобилей ⁴	105	-105	0	2,04	0	80	-105	0	1,13	0	105	-105	0	2,04	0
Крытый для легковесных ⁵	115	-115	0	4,18	0	86	-115	0	2,32	0	115	-115	0	4,18	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	112	-112	0	3,40	0	85	-112	0	1,90	0	112	-112	0	3,40	0
Платформа ⁷	112	-112	0	3,40	0	84	-112	0	1,90	0	112	-112	0	3,40	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$R_H = 350 \text{ м}, R_C = 400 \text{ м}$															
Полувагон ¹	37	-36	0	0	0	36	-36	0	0	0	40	-36	0	0	0
Крытый ²	36	-35	0	0	0	34	-35	0	0	0	39	-35	0	0	0
Платформа ³	53	-51	0	0,003	0	41	-51	0	0,001	0	56	-52	0	0,006	0
Крытый для автомобилей ⁴	94	-92	0	0,775	0	69	-92	0	0,391	0	99	-94	0	1,06	0
Крытый для легковесных ⁵	104	-103	0	1,82	0	75	-103	0	0,947	0	109	-105	0	2,39	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	100	-99	0	1,33	0	73	-99	0	0,695	0	105	-101	0	1,77	0
Платформа ⁷	102	-100	0	1,50	0	73	-100	0	0,749	0	107	-102	0	1,99	0
$R_H = 200 \text{ м}, R_C = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	59	-58	0	0,017	0	56	-58	0	0,013	0	64	-59	0	0,028	0
Крытый ²	58	-57	0	0,014	0	54	-57	0	0,009	0	63	-58	0	0,010	0
Платформа ³	80	-79	0	0,223	0	64	-79	0	0,125	0	84	-80	0	0,289	0
Крытый для автомобилей ⁴	132	-131	0	11,56	0	99	-131	0	6,39	0	137	-133	0,007	14,02	0
Крытый для легковесных ⁵	143	-142	0,068	20,22	0	105	-141	0,025	10,83	0	147	-143	0,103	22,73	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	141	-140	0,046	18,40	0	104	-139	0,016	9,81	0	146	-142	0,089	21,74	0
Платформа ⁷	137	-136	0,011	15,08	0	101	-136	0,003	8,33	0	142	-138	0,042	18,03	0
$R_H = 250 \text{ м}, R_C = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	58	-58	0	0,015	0	56	-58	0	0,013	0	58	-58	0	0,015	0
Крытый ²	57	-57	0	0,013	0	54	-57	0	0,009	0	57	-57	0	0,013	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Платформа ³	79	-79	0	0,212	0	65	-79	0	0,128	0	79	-79	0	0,212	0
Крытый для автомобилей ⁴	131	-131	0	11,24	0	100	-131	0	6,44	0	131	-131	0	11,24	0
Крытый для легковесных ⁵	141	-141	0,051	18,84	0	106	-141	0,025	10,90	0	141	-141	0,051	18,84	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	139	-139	0,031	17,10	0	106	-139	0,016	9,95	0	139	-139	0,031	17,10	0
Платформа ⁷	136	-136	0,007	14,70	0	102	-136	0,003	8,39	0	136	-136	0,007	14,70	0
$R_n = 300 \text{ м}, R_c = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	56	-58	0	0,013	0	56	-58	0	0,013	0	51	57	0	0,007	0
Крытый ²	55	-57	0	0,010	0	54	-57	0	0,009	0	51	-56	0	0,006	0
Платформа ³	77	-78	0	0,182	0	66	-78	0	0,121	0	73	-77	0	0,143	0
Крытый для автомобилей ⁴	129	-131	0	10,65	0	101	-131	0	6,49	0	125	-129	0	9,0	0
Крытый для легковесных ⁵	140	-141	0,046	18,40	0	108	-141	0,025	11,06	0	135	-139	0,016	15,54	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	138	-139	0,027	16,68	0	107	-139	0,016	10,03	0	133	-137	0,007	14,02	0
Платформа ⁷	134	-136	0,003	13,97	0	103	-136	0,003	8,45	0	130	-134	0	11,94	0
$R_n = 350 \text{ м}, R_c = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	55	-58	0	0,012	0	56	-58	0	0,013	0	45	-56	0	0,005	0
Крытый ²	53	-56	0	0,007	0	54	-56	0	0,008	0	45	-55	0	0,004	0
Платформа ³	76	-78	0	0,174	0	67	-78	0	0,124	0	68	-75	0	0,102	0
Крытый для автомобилей ⁴	128	-130	0	10,06	0	103	-130	0	6,29	0	118	-127	0	7,05	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Крытый для легковесных ⁵	138	-141	0,036	17,56	0	109	-141	0,025	11,15	0	128	-137	0,007	12,53	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	136	-138	0,015	15,48	0	108	-138	0,011	9,67	0	126	-135	0,001	11,23	0
Платформа ⁷	133	-135	0,001	13,25	0	105	-135	0,001	8,19	0	124	-132	0	9,70	0
$R_H = 400 \text{ м}, R_C = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	54	-58	0	0,011	0	55	-58	0	0,012	0	39	-56	0	0,005	0
Крытый ²	52	-56	0	0,006	0	54	-56	0	0,008	0	40	-54	0	0,003	0
Платформа ³	74	-78	0	0,159	0	68	-78	0	0,128	0	62	-74	0	0,078	0
Крытый для автомобилей ⁴	126	-130	0	9,54	0	104	-130	0	6,36	0	111	-124	0	5,35	0
Крытый для легковесных ⁵	137	-140	0,027	16,72	0	110	-141	0,025	11,25	0	122	-135	0	10,35	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	135	-138	0,011	15,12	0	110	-138	0,011	9,85	0	119	132	0	8,72	0
Платформа ⁷	132	-135	0	12,92	0	105	-135	0	8,19	0	118	130	0	7,91	0
$R_H = 450 \text{ м}, R_C = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	52	-58	0	0,009	0	54	-58	0	0,011	0	34	-56	0	0,005	0
Крытый ²	51	-56	0	0,006	0	53	-56	0	0,007	0	35	-54	0	0,003	0
Платформа ³	73	-77	0	0,143	0	68	-78	0	0,128	0	57	-72	0	0,057	0
Крытый для автомобилей ⁴	125	-129	0	9,0	0	105	-130	0	6,43	0	105	-122	0	4,35	0
Крытый для легковесных ⁵	135	-140	0,02	15,97	0	112	-141	0,025	11,45	0	115	-133	0	8,46	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	133	-138	0,011	14,43	0	111	-138	0,011	9,96	0	112	-130	0	7,09	0

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Платформа ⁷	130	-135	0	12,31	0	107	-135	0	8,34	0	112	-128	0	6,49	0
$R_n = 500 \text{ м}, R_c = 250 \text{ м}$															
Полувагон ¹	50	-58	0	0,008	0	54	-58	0	0,011	0	30	-56	0	0,005	0
Крытый ²	49	-56	0	0,005	0	53	-56	0	0,007	0	30	-54	0	0,003	0
Платформа ³	71	-77	0	0,132	0	69	-78	0	0,132	0	52	-71	0	0,047	0
Крытый для автомобилей ⁴	123	-129	0	8,55	0	107	-130	0	6,59	0	98	-120	0	3,53	0
Крытый для легковесных ⁵	134	-140	0,020	15,63	0	113	-141	0,025	11,57	0	109	-131	0	7,09	0
Крытый «ракетовоз» ⁶	132	-137	0,007	13,69	0	113	-138	0,011	10,18	0	105	-128	0	5,83	0
Платформа ⁷	129	-134	0	11,65	0	108	-135	0	8,43	0	106	-127	0	5,63	0

¹ – стандартный полувагон моделей 12-119, 12-132, 12-196 и подобных с $l_б = 8,65 \text{ м}$ и $l_к = 2,635 \text{ м}$.

² – стандартный крытый вагон моделей 11-217, 11-264, 11-270, 11-274 и подобных с $l_б = 10,0 \text{ м}$ и $l_к = 2,365 \text{ м}$.

³ – стандартная платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров моделей 13-2116, 13-470, 13-1223, 13-9004 и подобных с $l_б = 14,72 \text{ м}$ и $l_к = 2,45 \text{ м}$.

⁴ – крытый вагон для перевозки автомобилей моделей 11-287, 11-835, 11-720, 13-9752 и подобных с $l_б = 17,0 \text{ м}$ и $l_к = 3,63 \text{ м}$.

⁵ – крытый вагон ЦМГВ для перевозки легковесных грузов моделей 11-1709, 11-1759 и подобных с $l_б = 18,0 \text{ м}$ и $l_к = 3,81 \text{ м}$.

⁶ – крытый вагон для перевозки легковесных грузов моделей 11-К651, 15Т192, 15Т197, 15Т223 и подобных с $l_б = 17,0 \text{ м}$ и $l_к = 3,84 \text{ м}$.

⁷ – платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров моделей 13-2118, 13-4128 и подобных с $l_б = 19,0 \text{ м}$ и $l_к = 3,61 \text{ м}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пример расчета экономического эффекта выправки перевальной части сортировочных горок «Ч» и «Н»

Выполненный анализ на соответствие нормативным требованиям горбов сортировочных горок «Ч» и «Н», результаты которого приведены в таблице 5.3, показал, что перевальные части обеих горок требуют выправки, так как радиусы сопрягающих вертикальных кривых вышли за предельно допустимые пределы:

– для горки «Ч» радиус вертикального сопряжения со стороны спускной части на двух горбах составляет 140 и 170 м;

– для горки «Н» радиус вертикального сопряжения со стороны спускной части на двух горбах составляет 380 и 420 м, на третьем – 225 м, а со стороны надвижной части – свыше 400 м.

Экономический эффект при реализации проекта выправки горба горки «Ч» с увеличением радиуса вертикальной кривой до нормативного значения 250 м может отсутствовать вовсе. Так как основная задача данной выправки – приведение в соответствие продольного профиля горбов с требованиями норм [110, 125], без которой эксплуатация сортировочной горки не допускается по условиям безопасности проведения маневровой работы. Следует отметить, что экономический эффект и в данном случае присутствует, и складывается из снижения риска повреждения подвижного состава и, соответственно, снижения расходов на его ремонт, а также снижения эксплуатационных расходов на ликвидацию возможных последствий данных повреждений и саморасцепов вагонов. Расчет данного экономического эффекта затруднителен из-за случайного характера появления этих повреждений подвижного состава, в том числе скрытых, а также наличия усталостных повреждений деталей в результате накопления повреждений при действии многократно повторяющихся нагрузок, и, соответственно, сложности отнесения данных дефектов конкретно на рассматриваемую сортировочную горку.

Перевальная часть сортировочной горки «Н» также требует выправки, так как радиусы вертикального сопряжения двух горбов достигают величин 400 м.

Данное обстоятельство ухудшает условия отделения отцепов от состава, снижает скорость роспуска и, соответственно, перерабатывающую способность горки. Расчет экономического эффекта от реализации проекта выправки в соответствии с разработанной методикой (см. п. 5.6) приведен ниже.

В результате реализации проекта выправки перевальной части горки «Н»¹, предусматривающего снижение радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части до 250 м, а со стороны надвигной до 350 м, улучшаются следующие показатели:

- увеличивается скорость роспуска на 3,5 %;
- снижается время роспуска на 0,32 мин/состав;
- уменьшается горочный технологический интервал из-за улучшения динамических свойств горба горки на 0,21 мин/состав;
- снижается число нерасцепов вагонов на 22 % (на 4 шт./сут);
- уменьшается горочный технологический интервал из-за снижения числа нерасцепов на 0,2 мин/состав;
- увеличивается перерабатывающая способность горки на 155 ваг/сут.

Величины расходных ставок приняты следующими:

- час занятия 1 км станционных путей – 10,87 р.;
- локомотиво-час маневровой работы – 2069,62 р.;
- вагоно-час – 0 р.

Расчет экономии эксплуатационных расходов сведен в таблицу Б.1. Суммарная экономия эксплуатационных расходов за счет выправки продольного профиля перевальной части горки «Н» составит 978727 р./год.

Требуемые объемы работ на проведение выправки трех горбов перевальной части сортировочной горки «Н» приведены в таблице Б.2. Калькуляция на проведение выправки с применением средств малой механизации представлена в таблице Б.3.

¹ Среднесуточная переработка на горке принята по отчетным данным за 2015 г. и составляет 4096 ваг./сут или 63 состава/сут.

Таблица Б.1 – Расчет экономии эксплуатационных расходов в результате проведения выправки перевальной части сортировочной горки «Н»

Составляющие элементы экономического эффекта	Влияющий параметр		Показатель эффективности		Величина экономии расходов, р./год
	Наименование	Изменение параметра в результате выправки	Единица измерения	Эффект в результате выправки	
1	2	3	4	5	6
Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{пп}$, связанная с простоем вагонов в предгорочном парке (парке приема) из-за ожидания расформирования	Среднее время ожидания расформирования $t_{ор}$, мин	$\Delta t_{ор} = -0,6$	ваг.-ч простоя / год	-12859,0	0
Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{расф}$, получаемая в результате уменьшения вагоно-часов простоя подвижного состава на станции в процессе расформирования	Величина горочного технологического интервала $t_{ги}$, мин	$\Delta t_{ги} = -0,41$	ваг.-ч простоя / год	-10216,1	0
Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{нак}$, получаемая в результате уменьшения простоя вагонов под накоплением на состав	$t_{ги}$, мин	$\Delta t_{ги} = -0,41$	ваг.-ч простоя/год	-433,8	0

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6
Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{гл}}$, получаемая в результате уменьшения затрат на работу горочных локомотивов за счет сокращения продолжительности расформирования составов на горке	$t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ги}} = -0,41$	лок.-ч маневровой работы / год	-157,1	325 137
Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{ман}}$, получаемая в результате уменьшения затрат на маневровую работу за счет сокращения времени на перестановку «чужаков»	Число «чужаков» из-за нерасцепов вагонов $n_{\text{ч}}$, шт/сут	$\Delta n_{\text{ч}} = -4$	лок.-ч маневровой работы / год	-121,7	251 873
Экономия эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{п}}$, вызванная уменьшением времени занятия станционных путей	$t_{\text{ор}}$, мин; $t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ор}} = -0,6$; $\Delta t_{\text{ги}} = -0,41$	час занятия 1 км станционных путей / год	-452,3	4 917
Экономический эффект $\Delta \mathcal{E}_{\text{доп}}$, обусловленный ростом перерабатывающей способности горки	$t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ги}} = -0,41$	рост переработки, ваг. / сут	+155	396 800
ИТОГО					978 727

Таблица Б.2 – Объемы работ для проведения выправки перевальной части сортировочной горки «Н»

Наименование работ	Измеритель работы	Объемы работ по горбам перевальной части горки			Всего по горке
		Первый горб	Второй горб	Третий горб	
Инструментальная съемка продольного профиля. Визирование пути оптическим прибором ПРП	м	162	160	143	465
Доставка щебеночного балласта	м ³	52	26	34	112
Выгрузка и распределение щебеночного балласта на пути	м ³	52	26	34	112
Вырезка щебеночного балласта	м	0	36	38	74
Выправка пути. Исправление просядок и перекосов пути на щебеночном балласте подбивкой шпал электрошпалоподбойками	м	162	160	143	465
Оправка балластной призмы	м	162	160	143	465

Таблица Б.3 – Калькуляция на выправку горбов перевальной части сортировочной горки «Н» с применением средств малой механизации

Вид затрат	Единица измерения	Количество	Цена, р.	Сумма, р.
1 Прямые затраты:				
1.1 Затраты труда	чел.-ч	488,77	–	–
1.2 Фонд оплаты труда монтажников пути	р.	–	–	56935,70
1.3 Стоимость эксплуатации машин и механизмов без заработной платы машинистов	р.	–	–	4205,14
1.4 Фонд оплаты труда машинистов	р.	–	–	1026,08
2 Материалы верхнего строения пути: щебень	м ³	112	600	67200,00
3 Транспортно-заготовительские расходы	–	–	–	9065,28
4 Итого прямых затрат	–	–	–	138432,20
5 Накладные расходы	–	–	–	88101,91
6 Единый социальный налог	–	–	–	19822,93
7 Итого	–	–	–	246357
8 Прочие работы и затраты	–	–	–	1231,79
9 Итого по калькуляции	–	–	–	247588,80

Калькуляция составлена на основе технолого-нормировочных карт, учитывающих нормы времени на работы по текущему содержанию и ремонту пути [135]. Согласно калькуляции, суммарные затраты на проведение выправки всех трех горбов перевальной части сортировочной горки «Н» вместе с материалами составили 248 тыс. р.

Таким образом, срок окупаемости затрат на проведение выправки продольного профиля трех горбов перевальной части горки «Н» в соответствии с формулой (5.23) составит:

$$T_{\text{ок}} = \frac{247589}{978727} = 0,253 \text{ года} \approx 3 \text{ месяца}$$

Экономический эффект от реализации проекта выправки продольного профиля трех горбов перевальной части горки «Н» согласно формуле (5.13) при периодичности выправки один раз в три года составит:

$$\text{ЭФ} = 978727 - 247589 / 3 = 896197,3 \text{ р./год.}$$

При периодичности выправки один раз в год экономический эффект составит:

$$\text{ЭФ} = 978727 - 247589 / 1 = 731138 \text{ р./год.}$$

Результаты расчетов показывают, что реализация проекта выправки перевальной части горки «Н», имеющей увеличенные радиусы вертикальных кривых, экономически целесообразна.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Пример сравнения вариантов конструкции продольного профиля перевальной части сортировочной горки

В качестве примера произведено технико-экономическое сравнение двух вариантов конструкции продольного профиля перевальной части сортировочной горки. Первый вариант характеризуется следующими параметрами профиля горба горки:

- крутизна противоуклона со стороны подвижной части $i_n = 8 \text{ ‰}$;
- радиус вертикальной кривой при сопряжении профиля на горбе со стороны подвижной части $R_n = 350 \text{ м}$;
- крутизна уклона первого скоростного элемента составляет $i_c = 45 \text{ ‰}$;
- радиус вертикальной кривой при сопряжении профиля на горбе со стороны спускной части $R_c = 250 \text{ м}$.

Второй вариант продольного профиля отличается от первого радиусом вертикальной кривой R_c , сопрягающей профиль на горбе со стороны спускной части, равным 300 м.

При сравнении вариантов конструкции продольного профиля за базовый принимается первый вариант ($R_c = 250 \text{ м}$). Для данного варианта приняты следующие исходные данные:

- расчетная скорость роспуска – 1,7 м/с;
- число горочных локомотивов – 2;
- горочный технологический интервал – 14,5 мин/состав;
- среднесуточная переработка вагонов на горке – 3500 ваг./сут;
- среднесуточное число расформировываемых составов – 50 составов/сут;
- суммарное время занятия горки в течение суток для выполнения постоянных операций, не изменяющихся пропорционально с увеличением объема переработки – 90 мин/сут.

Второй вариант имеет больший радиус вертикальной кривой со стороны спускной части ($R_c = 300$ м), в результате чего, по сравнению с базовым вариантом, ухудшается (см. п. 5.6.1) ряд показателей:

- уменьшается расчетная скорость роспуска на 3,3 %;
- увеличивается время роспуска на 0,33 мин/состав;
- увеличивается горочный технологический интервал из-за ухудшения динамических свойств горба горки на 0,22 мин/состав;
- увеличивается число нерасцепов вагонов на 15 % (на 2 шт./сут);
- увеличивается горочный технологический интервал из-за увеличения числа нерасцепов на 0,2 мин/состав;
- уменьшается перерабатывающая способность горки на 143 ваг./сут.

При расчете эксплуатационных расходов величины расходных ставок приняты следующими:

- час занятия 1 км станционных путей – 10,87 р.;
- локомотиво-час маневровой работы – 2069,62 р.;
- вагоно-час – 0 р.

Расчет разницы эксплуатационных расходов сведен в таблицу В.1. Суммарная разница эксплуатационных расходов первого ($R_c = 250$ м) и второго варианта ($R_c = 300$ м) составит 759 356 р./год.

Калькуляции на сооружение перевальной части по различным вариантам не приводятся, так как перечень работ и требуемые объемы материалов сопоставимы. Следовательно, суммарные затраты по вариантам принимаются условно равными.

Результаты расчетов показывают, что применение на горбе горки минимального радиуса вертикальной кривой со стороны спускной части, равного 250 м, экономически целесообразно.

Таблица В.1 – Расчет разницы эксплуатационных расходов по сравниваемым вариантам продольного профиля перевальной части горки (относительно базового варианта с $R_c = 250$ м)

Составляющий элемент экономического эффекта	Влияющий параметр		Показатель эффективности		Разница эксплуатационных расходов, р./год
	Наименование	Изменение параметра относительно базового варианта	Единица измерения	Изменение показателя относительно базового варианта	
1	2	3	4	5	6
Разница эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{пп}}$, связанная с простоем вагонов в предгорочном парке (парке приема) из-за ожидания расформирования	Среднее время ожидания расформирования $t_{\text{ор}}$, мин	$\Delta t_{\text{ор}} = 0,4$	ваг.-ч простоя / год	7786,7	0
Разница эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{расф}}$, получаемая в результате уменьшения вагоно-часов простоя подвижного состава на станции в процессе расформирования	Величина горочно-го технологического интервала $t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ги}} = 0,42$	ваг.-ч простоя / год	8942,5	0
Разница эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{нак}}$, получаемая в результате уменьшения простоя вагонов под накоплением на состав	$t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ги}} = 0,42$	ваг.-ч простоя / год	279,5	0

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6
Разница эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{гл}}$, получаемая в результате уменьшения затрат на работу горочных локомотивов за счет сокращения продолжительности расформирования составов на горке	$t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ги}} = 0,42$	лок.-ч маневровой работы / год	127,8	264 394
Разница эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{ман}}$, получаемая в результате уменьшения затрат на маневровую работу за счет сокращения времени на перестановку «чужаков»	Число «чужаков» из-за нерасцепов вагонов $n_{\text{ч}}$, шт/сут	$\Delta n_{\text{ч}} = 2$	лок.-ч маневровой работы / год	60,8	125 902
Разница эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_{\text{п}}$, вызванная уменьшением времени занятия станционных путей	$t_{\text{ор}}$, мин $t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ор}} = 0,4$ $\Delta t_{\text{ги}} = 0,42$	час занятия 1 км станционных путей / год	274,2	2 980
Экономический эффект $\Delta \mathcal{E}_{\text{доп}}$, обусловленный изменением перерабатывающей способности сортировочной горки	$t_{\text{ги}}$, мин	$\Delta t_{\text{ги}} = 0,42$	рост перера- ботки, ваг. / сут	- 143	366 080
ИТОГО					759 356

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о регистрации программы «Спуск-2»



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КООРДИНАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ОТРАСЛЕВОЙ ФОНД АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ ОТРАСЛЕВОЙ
РЕГИСТРАЦИИ РАЗРАБОТКИ**

№ 7848

Настоящее свидетельство выдано на разработку:

**Программа для расчета параметров сортировочных горок
«Спуск-2»**

зарегистрированную в Отраслевом фонде алгоритмов и программ.

Дата регистрации: 05 марта 2007 года

Авторы: Карасёв С.В., Осипов Д.В.

Организация-разработчик: Сибирский государственный университет
путей сообщения



Директор  Е.Г. Калинкевич

Руководитель ОФАП  А.И. Галкина

Дата выдачи 15.03.2007

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство о регистрации программы «Горб горки – Проверка профиля»



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акты о внедрении результатов диссертационной работы



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
**ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
 УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ**
 СТРУКТУРНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ
**ЗАПАДНО-СИБИРСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
 УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ**

ул. Вокзальная магистраль, 12,
 г. Новосибирск, 630004
 Тел.: (383) 229-48-02, факс: (383) 229-93-88

«04» 04 2017 г. № 1670/ЗСД

На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
 Осипова Дмитрия Валентиновича

Результаты, полученные Осиповым Д.В. при выполнении диссертационной работы на тему: «Совершенствование методов расчета параметров перевальной части сортировочных горок», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.08 – «Управление процессами перевозок», имеют прикладное значение для железнодорожных станций, имеющих сортировочные горки.

Выполнена апробация предлагаемого метода определения рациональных параметров перевальной части сортировочных горок для станции Инская Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения предлагаемых в диссертационной работе методов при планируемом или внеплановом выполнении работ по выправке продольного профиля сортировочных горок. Для станции Инская определены: экономия эксплуатационных расходов при реализации предлагаемого варианта, сокращение горочного технологического интервала, увеличение перерабатывающей способности сортировочной горки.

Разработанная методика представляет практическую ценность и может быть применена для определения оптимальных (рациональных) конструктивных и технологических параметров горочных сортировочных устройств других станций ОАО «РЖД».

Начальник дирекции

Исполнитель Бережнок Д.П.
 229-44-38



Д.М.Рахимжанов



Новосибирский проектно-изыскательский институт
«СИБЖЕЛДОРПРОЕКТ» -
филиал АО «Росжелдорпроект»

Пр. Димитрова, дом 14/1
Новосибирск, Россия, 630099

т: (383) 229 45 11

ф: (383) 229 57 24

е: sibjdp@rzdpr.ru

w: www.rzdp.ru

05.04.2014 № 66-МХ - 00943/14

На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования Осипова Дмитрия Валентиновича

Результаты диссертационного исследования Осипова Д.В. на тему «Совершенствование методов расчета параметров перевальной части сортировочных горок», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.08 – «Управление процессами перевозок», использованы при выполнении проектных работ по реконструкции нечетной и четной сортировочных горок станции Инская Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

В частности, предлагаемые в диссертационной работе методы использованы для анализа продольного профиля горбов сортировочных горок станции Инская, а также при определении рационального варианта продольного профиля перевальной части горок в пределах допустимого нормами и правилами проектирования диапазона значений радиусов вертикальных кривых.

Предложенные варианты реализованы на стадии проектирования, использованы при разработке технических решений и проектов модернизации сортировочных горок станции Инская, выполненных институтом «СИБЖЕЛДОРПРОЕКТ» - филиалом АО «РОСЖЕЛДОРПРОЕКТ».

Главный инженер филиала



А.В. Кузин

Исполнитель: Шелепова М.В.
Тел. (383) 201-12-12