



ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ  
ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА  
СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ



В. И. Бобровский  
Д. Н. Козаченко  
Н. П. Божко  
Н. В. Рогов  
Н. И. Березовый  
А. В. Кудряшов



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И СВЯЗИ УКРАИНЫ

Днепропетровский национальный университет железнодорожного  
транспорта имени академика В. Лазаряна

В.И. БОБРОВСКИЙ  
Д.Н. КОЗАЧЕНКО  
Н.П. БОЖКО  
Н.В. РОГОВ  
Н.И. БЕРЕЗОВЫЙ  
А.В. КУДРЯШОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ  
НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

УДК 625.16  
ББК 39.213.45-041я9  
О 62  
ISBN 978-966-1507-25-7  
Издательство Маковецкий Ю.В.  
Днепропетровск, 2010

*Рекомендовано к печати решением Ученого совета Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (протокол № 1 от 28.09.2009 года)*

*Рецензенты:*

*Д-р техн. наук, проф. Евгений Васильевич Нагорный, заведующий кафедрой «Транспортные технологии» Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Украина*

*Д-р техн. наук, проф. Татьяна Васильевна Бутько, заведующая кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Украинской государственной академии железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ**

**О 62 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ:**

Монография // В.И. Бобровский, Д.Н. Козаченко, Н.П. Божко, Н.В. Рогов, Н. И. Березовый, А.В. Кудряшов – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2010. – 260с. — ISBN 978-966-1507-25-7

УДК 625.16  
ББК 39.213.45-041я9

Монография посвящена разработке методов оптимизации режимов торможения отцепов на сортировочных горках.

Книга предназначена для ученых, инженеров, аспирантов, студентов высших учебных заведений железнодорожного транспорта

© Издательство Маковецкий Ю.В.  
Днепропетровск, 2010  
© Днепропетровский Национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК.....	8
1.1. Пути сокращения энергетических расходов на сортировку вагонов на горках .....	8
1.2. Актуальные проблемы совершенствования методов управления процессом расформирования составов на горках.....	14
1.3. Анализ методов оптимизации процесса расформирования составов... 24	
1.4. Постановка задачи исследований .....	30
2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ С СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ.....	34
2.1. Формализация процесса торможения отцепа при скатывании с горки.....	34
2.1.1. Балочные замедлители весового типа.....	38
2.1.2. Балочные замедлители нажимного типа .....	41
2.1.3. Балочные замедлители со стабильной тормозной характеристикой.....	44
2.2. Методика расчета энергетических расходов, связанных с торможением вагонов .....	46
2.3. Совершенствование имитационной модели скатывания отцепа с горки .....	49
2.3.1. Методика моделирования движения отцепов .....	50
2.3.2. Моделирование движения отцепов с низкими скоростями .....	56
2.3.3. Моделирование работы тормозных позиций.....	60
2.3.4. Моделирование регулируемого скатывания отцепов .....	63
2.3.5. Программная реализация имитационной модели скатывания отцепов.....	65
2.4. Исследование влияния режимов торможения на показатели процесса скатывания отцепов .....	65

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ СКАТЫВАЮЩИХСЯ ОТЦЕПОВ.....	78
3.1. Ограничения режимов торможения скатывающихся отцепов.....	78
3.2. Определение области допустимых режимов торможения .....	84
3.3. Исследование зависимости режимов торможения от параметров отцепов и условий их скатывания .....	92
3.4. Зависимость параметров ОДР от сопротивления движению отцепа....	96
3.5. Влияние требуемой дальности скатывания отцепа на режим торможения .....	101
3.6. Анализ работы тормозных сил при скатывании отцепа с горки.....	108
4. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗДЕЛЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ.....	114
4.1. Постановка задачи исследований.....	114
4.2. Определение максимальных интервалов между отцепами на разделительных стрелках .....	116
4.3. Ограничения режимов торможения по условиям интервального регулирования.....	139
4.4. Интервалы между отцепами на замедлителях тормозных позиций ...	144
4.5. Исследование влияния режимов торможения крайних отцепов расчетной группы на условия разделения .....	150
4.6. Взаимосвязь интервального регулирования скорости и энергетических расходов та торможение отцепов .....	155
5. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ ПРИ РОСПУСКЕ СОСТАВОВ НА ГОРКАХ .....	166
5.1. Постановка задачи оптимизации .....	166
5.2. Итерационный метод оптимизации режимов торможения отцепов состава .....	169
5.3. Оптимизация режимов торможения отцепов критической группы ...	172
5.4. Анализ результатов оптимизации режимов торможения отцепов состава итерационным методом .....	174

5.5. Исследование и оценка эффективности итерационного метода оптимизации режимов торможения отцепов состава.....	182
5.6. Выбор критерия завершения итерационного процесса.....	188
5.7. Минимизация энергетических расходов на управление скоростью скатывания отцепов состава .....	192
<b>6. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РОСПУСКА ПОТОКА СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ.....</b>	<b>197</b>
6.1. Моделирование случайного потока вагонов, отцепов, составов .....	197
6.1.1. <i>Моделирование длины и назначения отцепов .....</i>	<i>198</i>
6.1.2. <i>Моделирование параметров отцепов.....</i>	<i>199</i>
6.1.3. <i>Моделирование заполнения сортировочных путей перед роспуском состава.....</i>	<i>201</i>
6.2. Модель сортировочной горки.....	203
6.2.1. <i>Геометрическая модель плана путевого развития.....</i>	<i>203</i>
6.2.2. <i>Модель продольного профиля горки.....</i>	<i>206</i>
6.2.3. <i>Модель занятия путевых участков подвижным составом.....</i>	<i>209</i>
6.3. Модели объектов подвижного состава .....	210
6.4. Моделирование перемещения объектов .....	211
6.5. Определение показателей функционирования горки.....	213
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>216</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>222</b>
Приложение А. Программа имитационного моделирования скатывания отцепов с горки.....	232
Приложение Б. Условия проведения вычислительных экспериментов....	237
Приложение В. Зависимости параметров ОДР от потребной дальности скатывания отцепов.....	238
Приложение Г. Построение линий режимов $U=h''(h')$ с равными интервалами $\overline{\delta t}$ между отцепами расчетной группы .....	245
Приложение Д. Минимизация энергетических расходов на регулирование скорости скатывания отцепов.....	254

## ВВЕДЕНИЕ

В монографии изложена методика оптимизации режимом торможения отцепов на базе имитационной модели процесса роспуска составов. Эта модель была усовершенствована с целью обеспечения решения задачи сокращения расходов энергоресурсов на торможения отцепов. В работе выполнена детальная формализация процесса взаимодействия замедлителей разного типа с вагонами, проведено его математическое описание и разработана имитационная модель процесса торможения отцепов.

В результате исследований на модели было установлено существование области допустимых режимов торможения отцепов и определены зависимости ее параметров от сопротивления движению отцепов, их длины, необходимой дальности скатывания в различных условиях. Формализована и решена задача оптимизации режимов торможения отцепов состава по критерию минимума энергетических расходов, на основании разработанного итерационного метода, выполнены детальные исследования его эффективности.

В процессе моделирования роспуска составов фиксируются показатели работы горки, в том числе общие расходы энергоресурсов. Это позволяет использовать разработанную модель для поиска рациональной технологии роспуска составов, а также для технико-экономической оценки вариантов конструкции сортировочных горок.

## ГЛАВА 1

### СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК.

#### **1.1. Пути сокращения энергетических расходов на сортировку вагонов на горках**

Железнодорожный транспорт является одним из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов Украины, причем значительная часть потребления приходится на перевозочный процесс. Для обеспечения конкурентоспособности железных дорог в условиях жесткого рынка транспортных услуг, а также для повышения эффективности перевозочного процесса необходимо внедрять прогрессивные энергосберегающие технологии. Задачи энергосбережения отражены как в законодательных актах и постановлениях Кабинета Министров Украины [1, 2], общих для всех отраслей экономики, так и в отраслевых программах железнодорожного транспорта Украины [3].

Значительные затраты энергоресурсов и приведенных капиталовложений в хозяйстве перевозок приходится на крупные сортировочные станции, выполняющие операции по массовому расформированию и формированию поездов, и, в частности, на сортировочные горки. Сортировочные горки являются основными устройствами для расформирования составов грузовых поездов на железнодорожных станциях и играют важную роль в ускорении доставки грузов и сокращении простоев вагонов. Конструкция, техническое оснащение и технология работы сортировочных горок существенно влияют на эксплуатационные расходы по расформированию поездов, которые условно можно разделить на следующие составляющие:

- расходы на маневровую работу по расформированию;
- расходы по содержанию постоянных устройств;
- расходы по управлению маршрутами и управление скоростью скатывания вагонов.

Согласно этому в современной теории сложились соответствующие направления совершенствования сортировочного процесса, имеющие своей целью повышение эффективности и снижение расходов на расформирование составов.

Одним из таких направлений является совершенствование конструкции плана и продольного профиля сортировочных горок. В данное время основными нормативными документами по проектированию вновь строящихся и переустраиваемых сортировочных устройств являются «Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР» [4] и «Пособие по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств» [5]. Эти документы предусматривают при проектировании технико-экономическое обоснование конструкции сортировочных устройств с учетом следующих затрат:

- на механическую работу по торможению вагонов;
- на маневровую работу по осаживанию (подтягиванию) вагонов на сортировочных путях и перестановке вагонов, не попавших на пути назначения при роспуске составов, на соответствующие пути;
- связанные с изменением высоты горки и потребной мощности тормозных средств;
- связанные с повреждением вагонов и грузов, а также сдвигами грузов при соударении отцепов с повышенной скоростью с вагонами на сортировочных путях.

Приведенные в [4, 5] методики определения указанных расходов основаны на соответствующих показателях сортировочного процесса, которые надлежит определять путем имитационного моделирования процесса расформирования потока составов на горке с помощью ЭВМ. Между тем, в настоящее время типовая модель расформирования состава отсутствует, и объективная оценка качества сортировочного процесса по приведенным расходам в настоящее время является невозможной. Этим объясняется то положение, что известные работы по оптимизации высоты и продольного профиля

горок лишены системного подхода и используют в качестве критерия оптимизации отдельные показатели качества, такие как мощность парковой тормозной позиции [6], заполнение путей сортировочного парка [7], условия разделения отцепов [8], скорость роспуска [9].

Таким образом, создание адекватной модели расформирования состава на сортировочной горке является важнейшей задачей, решение которой позволит принимать качественные проектные решения.

Другим направлением является совершенствование конструкции маневровых локомотивов и режимов управления ними. Работа локомотива при надвиге и роспуске является одной из составляющих расходов, связанных с расформированием составов на сортировочной горке. Величина этих расходов зависит от характеристик локомотивов, параметров состава и продольного профиля подвижной части сортировочной горки. Разработанные методики расчета и нормирования энергетических расходов при надвиге и роспуске составов [10-12] позволяют осуществлять выбор локомотива по критерию мощности и энергозатрат, определять оптимальные режимы работы горочных локомотивов и могут быть использованы при оптимизации конструкции продольного профиля подвижной части сортировочной горки.

Необходимо отметить, что задача оптимизация режимов работы локомотива при роспуске состава должна решаться комплексно, в увязке с процессом и условиями скатывания вагонов на спускной части горки.

Третьим направлением является разработка и модернизация технических средств регулирования скорости скатывания вагонов. Основными техническими средствами для регулирования скорости движения вагонов на сортировочных горках железнодорожных станций Украины являются балочные вагонные замедлители различных типов и принципа действия – весовые (КВ-3), нажимные (Т-50, КНП-5, ВЗПГ, НК-114, РНЗ). Опыт эксплуатации этих замедлителей [13] показал ряд их существенных недостатков: большая металлоемкость и многодетальность, наличие гидро- или пневмосооружений, высокая энергоемкость, усложненное техническое обслуживание.

Использование на действующих сортировочных горках пневматических замедлителей требует снабжения их сжатым воздухом, вырабатываемого компрессорными станциями, на производство которого расходуется электрическая энергия. В табл. 1.1 приведены данные о потреблении электрической энергии на станции Красный Лиман Донецкой ж. д. за 2004 г.

*Таблица 1.1*

Расход электрической энергии на расформирование вагонов

Наименование показателей		Значения показателей для горок	
		Южная горка	Северная горка
Расход электрической энергии, тыс. кВт·ч	Компрессорная	702,863	1108,452
	ГАЦ	50,808	78,502
	КГМ	157,848	-
Переработано вагонов, тыс. вагонов		789,559	1105,052

Приведенные в табл. 1.1 данные показывают, что компрессорные станции являются значительными потребителями электрической энергии, и большая часть этих расходов приходится на торможение вагонов. В условиях резкого подорожания и дефицитности энергоресурсов вопросы их экономии приобретают первостепенное значение.

Анализ сортировочных горок на железных дорогах Российской Федерации и Украины [14] свидетельствует, что около 70% парка эксплуатируемых сегодня замедлителей физически изношены и нуждаются в полной замене или капитальном ремонте, остальные эксплуатируемые технические средства в своем большинстве устарели и, кроме того, не удовлетворяют современным требованиям по функциональным возможностям. Около 60% всех технических средств выработало свой ресурс и находится на этапе непредсказуемого нарастания потока внезапных отказов. В этих условиях резко повышаются ежегодные эксплуатационные затраты, малоэффективными становятся регламентные работы по техническому обслуживанию физически изношенной техники.

Для изменения ситуации, связанной со старением и физическим износом техники, подготовлена «Программа обновления и развития средств авто-

матизации и механизации сортировочных станций и горок» [15], предусматривающая комплексную реконструкцию средств автоматизации и механизации на сортировочных станциях.

С учетом сложившихся обстоятельств актуальной является задача разработки нового поколения замедлителей, обладающих высокой надежностью и экономичностью в расходе энергоресурсов, небольшая металлоемкость и т.д., а также разработка и внедрение систем автоматизированного управления процессом отпуска.

Во второй половине 80-х годов сформировался новый подход к конструкции и производству замедлителей. В этот период разработаны и поставлены на производство замедлители ВЗПГ, РНЗ-2 [16], сравнительные данные которых свидетельствуют о том, что эта техника не только не уступает, но и по многим параметрам, в т.ч. по удельной тормозной мощности, энергоемкости, превосходят лучшие зарубежные аналоги. Внедрение новой техники позволяет получить значительную экономию средств за счет снижения капиталовложений на реализацию установочной мощности тормозных позиций снижения расхода энергоресурсов, сокращения повреждения вагонов и грузов, а также уменьшения трудовых затрат на эксплуатацию замедлителей [17, 18].

К новым разработкам можно отнести эксплуатирующийся в данное время на железных дорогах Российской Федерации [19] пневматический нажимной замедлитель КЗ-5. Новокраматорским машиностроительным заводом освоен выпуск нового пневматического нажимного вагонного замедлителя НК-114 в 3-х, 4-х и 5-звенном исполнении, предназначенного для использования при строительстве новых и реконструкции существующих горок взамен замедлителей всех типов, применяемых в СНГ, на любой из тормозных позиций. Технично-эксплуатационные характеристики новых замедлителей несколько выше, чем у замедлителей более ранних конструкций, однако, их применение не снимает проблем, связанных с воздухомоснабжением и переоснащение сортировочных горок потребует значительных капитальных вложений.

Применение новых, более экономичных типов пневматических замедлителей и внедрение систем автоматизированного управления их работой является важным мероприятием, обеспечивающим в перспективе не только снижение расхода энергоресурсов, но и риск порчи вагонов и грузов [20]. Эта проблема актуальна не только для Украины, но и для других стран мира с развитой железнодорожной отраслью [21]. Работы по модернизации основываются на имеющемся опыте не только в эксплуатации, но и в организации производства и должны обеспечивать уменьшение материалоемкости, улучшение технологичности и сокращение времени изготовления каждого узла, а также увеличение эксплуатационной надежности работы всех узлов и механизмов.

Перспективным направлением в совершенствовании вагонных замедлителей является разработка электромагнитного вагонного замедлителя (ЭВЗ) [22]. Тормозное усилие имеет две составляющие – электромагнитное поле и механическая, возникающая за счет сил трения тормозных шин и колес. Технично-эксплуатационные характеристики замедлителя определяют предпочтительную область применения ЭВЗ – парковая тормозная позиция или тормозные позиции на спускной части горок малой мощности. В Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта разработана [23] конструкция вагонного замедлителя нового поколения (ВЗНП), также основанная на использовании двух видов сопротивления. При экспериментальных исследованиях лабораторного образца были получены достаточно высокие результаты, однако, на данное время опытные образцы так и не изготовлены, и полевые испытания не проводились.

Решить проблему торможения вагонов на сортировочных горках различной мощности можно, используя механизмы и устройства, не потребляющие энергию извне.

Известна технология квазинепрерывного регулирования скорости отцепов, при которой сортировочные горки оборудуются неуправляемыми точечными вагонными замедлителями (ТВЗ), устанавливаемыми вдоль одного

или двух рельсов в шпальные ящики по маршруту следования от вершины горки до конца сортировочного парка. На сортировочных горках некоторых стран (Германия, Венгрия, Китай) эксплуатируются ТВЗ двух различных конструкций – газонаполненные (типа Даути, TDJ) и с тарельчатыми пружинами (Тиссен) [24]. Достаточно большой опыт эксплуатации китайских замедлителей TDJ накоплен на Октябрьской железной дороге в России [25] и в результате определены следующие выводы:

- замедлители имеют устойчивый тормозной эффект, не зависящий от погодных условий и состояния бандажей колес;
- трудозатраты на текущее содержание меньше по сравнению с клещевидными замедлителями;
- для торможения не требуется затрат электроэнергии, минимальны затраты на монтажные работы;
- для ремонта и технического обслуживания не требуется технологических «окон» и грузоподъемных механизмов.

К недостаткам замедлителей TDJ следует отнести невозможность их установки на станциях со значительным числом маневровых передвижений локомотивов (происходит износ гребня колесных пар), с большой интенсивностью роспуска составов, но основной эксплуатационный недостаток – низкий верхний предел (5 м/с) значения критической скорости и создание тормозного эффекта при движении на горку. Разработанный специалистами ВНИИЖТа замедлитель ТВЗ рассчитан на скорость до 6 м/с, его конструкция не допускает срабатывания при движении на горку. Не смотря на это, необходимо учитывать, что простая замена балочных замедлителей точечными, без дорогостоящей реконструкции профиля горки и подгорочных путей не может привести к желаемому эффекту [24].

Как показывает зарубежный опыт и исследования отечественных специалистов, в системах квазинепрерывного регулирования скорости на парковых путях требуется специализированное устройство, реализующее замедляюще-ускоряющее воздействие на отцеп.

Таким образом, применение новых и модернизация существующих пневматических нажимных замедлителей является одним из направлений снижения расхода энергоресурсов и усовершенствования процесса расформирования составов на сортировочных горках.

Важнейшим резервом экономии энергоресурсов является также снижение утечек воздуха в воздухопроводных сетях горок, которые соизмеримы с полезным расходом его на срабатывание замедлителей [20, 26]. Наиболее важными мероприятиями по сокращению непроизводительных потерь сжатого воздуха являются уплотнения в соединениях пневмосети, регулировка ступеней торможения, а также автоматизация управления работой компрессорных установок.

Четвертым направлением является внедрение систем автоматизации технологического процесса расформирования составов. Энергозатраты на торможение вагонов непосредственно связаны с количеством включений замедлителей. Данные наблюдений за работой замедлителей при ручном и автоматизированном управлении ими показывают [20, 26], что количество включений замедлителей под отцепами при ручном управлении в 1,4–2 раза больше, чем при автоматизированном.

Кроме того, исследования различных алгоритмов интервального регулирования [27] показывают зависимость энергозатрат от технологии регулирования скорости движения отцепов на спускной части горки. Из этого вытекает целесообразность энергосберегающих алгоритмов систем автоматизации, для разработки которых необходимы адекватные имитационные модели расформирования составов.

## **1.2. Актуальные проблемы совершенствования методов управления процессом расформирования составов на горках**

Автоматизация технологического процесса расформирования составов является главным направлением повышения производительности сортировочных горок, улучшения качества процесса расформирования составов, эффективного использования технических средств, улучшения условий труда

работников горки, снижения расходов на расформирование составов. Система комплексной автоматизации процесса расформирования составов на сортировочных горках [4] включает подсистему автоматизированного управления скоростью отцепов в процессе скатывания с горки (АРС). Система АРС предназначена для расчета и последующего задания в реальном масштабе времени значений скорости отцепов при выходе из тормозных позиций, обеспечивающих выполнение условий разделения маршрутов скатывания отцепов на разделительных стрелочных переводах (интервальное регулирование) и безопасного соединения вагонов на сортировочных путях (прицельное регулирование). Для реализации указанных скоростей система АРС осуществляет автоматическое управление замедлителями, которое необходимо для обеспечения требуемой точности реализации заданных значений скорости выхода отцепов из тормозных позиций.

Для автоматизации процесса регулирования скорости скатывания отцепов с горки были разработаны и внедрены два варианта отечественных систем: АРС ГТСС [28] и АРС ЦНИИ [29].

Качество работы любой автоматизированной системы управления определяют три составляющие: полнота и точность учета влияющих на процесс факторов, технологические принципы (алгоритмы) вычисления управляющих воздействий, способы реализации управляющих воздействий.

В системе АРС ГТСС скорости выхода отцепов из тормозных позиций спускной части устанавливаются по условию обеспечения одинаковой для всех отцепов скорости входа на следующую тормозную позицию.

В системе АРС ЦНИИ первая тормозная позиция (ТП1) обеспечивает необходимые интервалы между отцепами на головных стрелках и непосредственно на вторых тормозных позициях. Скорость выхода отцепов из ТП1 определяется в зависимости от ходовых свойств отцепов, устанавливаемых измерением ускорения движения или через эквивалентные значения их весовых категорий. Основные возможные ситуации между скатывающимися отцепами для ТП1 классифицируют по нарастающей сложности и для каждой

ситуации расчетом определяют интервальную скорость выхода. Вторая тормозная позиция (ТП2) выполняет функции прицельного и интервального регулирования.

В основу алгоритмов интервального регулирования заложен принцип обеспечения одинаковой продолжительности скатывания отцепов, при котором должны создаваться достаточные интервалы между отцепами для перевода разделительных стрелок. Такой подход является статистическим, обеспечивающим выполнение необходимых условий в среднем для потока отцепов, однако для отдельного сочетания отцепов условия разделения могут не выполняться в связи со случайными колебаниями ходовых свойств, внешних условий, погрешностями реализации заданных скоростей выхода.

Подобные системы относятся к типу разомкнутых систем, в которых управляющее устройство формирует закон управления по заданным граничным условиям и не учитывает координаты объектов управления, что приводит, в конечном счете, к рассогласованию теоретического и реального процесса [30]. Отсутствие в таких системах элементов оптимизации управляющих воздействий не может в принципе обеспечить повышение качества процесса. Эксплуатационные испытания первых отечественных систем автоматизации расформирования составов на горках АРС ЦНИИ и АРС ГТСС показали низкое качество интервального и прицельного регулирования скорости отцепов, высокую погрешность реализации заданных скоростей выхода и существенную долю вмешательства операторов в работу систем. Анализ результатов функционирования этих систем, приведенный в работах [31- 35], позволил выявить основные причины низкого качества работы: жесткая структура и специфика используемой элементной базы, учет ограниченного числа влияющих на процесс факторов, недостаточно точные и мало надежные средства сбора и переработки информации, упрощенные технологические принципы (алгоритмы) определения необходимых режимов торможения отцепов и примитивные методы их реализации. Полученные результаты определили пути совершенствования технической базы, разработки теоретиче-

ских и методологических основ систем управления расформированием составов.

Основные направления повышения качества сортировочного процесса связаны с разработкой новых алгоритмов для автоматизации управления роспуском составов. При автоматизации любого технологического процесса, прежде всего, возникает задача его формализации, т.е. математического описания связи показателей функционирования с влияющими факторами. Взаимосвязь показателей процесса расформирования составов и влияющими на него факторами может быть выражена системой векторных уравнений [31]:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= f_1(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{V}); \\ \mathbf{V} &= f_2(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{T}$  – вектор показателей качества процесса расформирования;

$\mathbf{Y}$  – вектор входящих переменных;

$\mathbf{Z}$  – вектор неконтролируемых переменных;

$\mathbf{V}$  – вектор управляемых переменных.

Получить функциональные зависимости между всеми взаимодействующими факторами в аналитическом виде для описания процесса расформирования составов на сортировочной горке практически не представляется возможным ввиду его сложности. В связи с этим при решении практических задач и выполнении теоретических исследований сортировочного процесса на горках получил применение метод имитационного моделирования с помощью ЭВМ.

Разработка и последующее совершенствование имитационной модели скатывания отцепов с сортировочной горки [36-38] позволили расширить круг исследуемых вопросов и приблизиться к решению системы (1.1). Использование методов экспериментально-статистической идентификации в сочетании с имитационным моделированием [31], позволили выполнить математическое описание и оптимизацию технологического процесса расформирования составов. Вместо расчетных схем и ограничивающих состояний

появилась возможность рассматривать конкретные ситуации по каждому отцепу и их совокупности в составе. Концепция новой методики, основные положения которой изложены в работах [31, 39], заключается в двухэтапном решении задачи автоматизации управления роспуском состава: оптимизационном (первый этап) и оперативном (второй этап). Первый этап предусматривает имитационное моделирование и оптимизацию процесса расформирования состава с целью получения для каждого отцепа оптимальных значений управляющих переменных ( $V$ ). На втором этапе происходит реализация управляющих воздействий и их корректировка в зависимости от сложившейся ситуации в процессе расформирования состава.

Основные идеи такого принципа регулирования реализованы в разработанных на новой технической базе и внедренных системах АСУ РСГ и КГМ. Опыт эксплуатации этих систем [40, 41] показал, что они успешно реализуют функции управления маршрутами, регистрацию действий операторов и диагностику исполнительных элементов. Вместе с тем, функции интервального и прицельного регулирования практически не используются и реализуются операторами в ручном режиме. Это свидетельствует о недостаточном качестве системы управления этими процессами, а основными причинами являются: несовершенство технологических алгоритмов, недостоверная информация и неполный учет влияющих факторов, несовершенные способы реализации управляющих воздействий, недостатки технических средств регулирования.

С целью улучшения технико-экономических показателей сортировочного процесса во ВНИИАС (Россия) совместно с ведущими специалистами отрасли была разработана (2000 г.) «Концепция механизации и автоматизации технологических процессов сортировочных станций» [41], предусматривающая решение указанных проблем. В рамках реализации этой концепции в настоящее время ведутся работы по созданию новых систем [15]: АРС ТРАКТ [42], УУПТ [43], КГМ-ПК [44]. Совершенствование этих систем, прежде всего, связано с использованием новых технических средств: совре-

менных промышленных компьютеров, замедлителей ВЗПГ и РНЗ-2М, новых скоростемеров РИС ВЗ-М, тензометрического весомера, системы КЗП на базе индуктивно-проводных датчиков ИПД. Реализация сложных функций регулирования скоростей скатывания отцепов базируется на новых подходах и алгоритмах адаптированного управления замедлителями, ситуационном управлении с использованием модели полного графа-дерева спусковой части горки, контроля и прогнозирования опасных ситуаций в динамике скатывания всех отцепов.

Теория оптимального управления роспуском состава получила развитие в работах [30, 45]. На базе модели процесса скатывания отцепов разработан математический аппарат адаптивной системы управления роспуском, способной корректировать параметры объектов и управляющие воздействия в процессе функционирования. Целесообразность и возможность адаптивного управления не вызывает сомнения, однако проблема оптимизации управляющих воздействий не решена и рассматривается лишь в плане общего описания без разработки методов нахождения оптимальных решений при различных критериях оптимизации. Проблемы и возможные методы оптимизации управляющих воздействий рассматриваются в данной работе в п. 1.3.

Здесь необходимо отметить, что в настоящее время для решения указанной задачи нет альтернативы имитационному моделированию процесса скатывания вагонов с горки. Поэтому разработка адекватной математической модели скатывания отцепа, учитывающей все влияющие факторы и адекватно описывающей управляющие воздействия, является актуальной теоретической проблемой. При этом моделирование свободного скатывания отцепов в теоретическом плане не вызывает трудностей, а результаты скатывания зависят только от точности учета постоянных и переменных факторов. Сложнее обстоит дело с моделированием регулируемого скатывания в зоне действия тормозных позиций.

В существующих моделях скатывания [30, 36-38] торможение вагонов на замедлителях (тормозных позициях) имитируется учетом дополнительно-

го сопротивления движению, величина которого в расчете на одну ось составляет:

$$w = \frac{h}{nl},$$

где  $h$  – мощность замедлителей или заданная величина погашаемой энергетической высоты;

$n$  – количество осей отцепа;

$l$  – рабочая длина замедлителей тормозной позиции.

Такой принцип, справедливый с позиций соответствия закону сохранения энергии, имеет существенные недостатки:

- не учитываются особенности взаимодействия колес вагонов с замедлителями в зависимости от принципа их действия (весовые, нажимные, со стабильной тормозной характеристикой);
- не учитывается давление рабочего тела в тормозных цилиндрах и характеристики замедлителей на определенных ступенях торможения;
- отсутствует возможность реализации команд управления (включения и выключения) замедлителей в определенные моменты времени или в зависимости от координаты положения отцепа.

Эти недостатки не позволяют адекватно моделировать процесс торможения, создают погрешности показателей процесса скатывания, не позволяют объективно оценивать расходы на торможение. Недостатки базовых моделей устранены в разработанных моделях процесса торможения, рассмотренных в работах [46-48]. Использование их в модели регулируемого скатывания отцепов требует доработки алгоритмов для возможности реализации временного или координатного (зонного) принципов управления процессом торможения.

Еще большие проблемы возникают в реальных условиях при реализации требуемых режимов торможения, которые связаны с отсутствием точной информации о ходовых свойствах отцепа и действующих тормозных силах, наличием инерционности тормозных средств. Это, в конечном счете, создает

погрешность реализации требуемой скорости выхода отцепа из тормозной позиции. В работе [49] для решения этой задачи предлагается стратегия адаптивного управления торможением, заключающегося в определении на элементарных перемещениях текущего ускорения  $a$ , вычислении на текущей ступени торможения координаты  $L_v$ , достижения заданной скорости выхода ( $v=v_v$ ) и принятии на основании этого решения об изменении тормозящего усилия путем регулирования ступени торможения. Алгоритм адаптивного управления, базирующийся на фильтрации параметров движения и статистической экстраполяции, позволяет реализовать плавный (мягкий) режим торможения, не требует специальных весомерных устройств и измерительных участков. Идеи этого метода реализованы в разработанном универсальном модуле управления тормозными позициями [50], который обеспечивает мягкий режим торможения на минимально необходимой тормозной силе, позволяет уменьшить на 20% расход сжатого воздуха и увеличить срок службы замедлителей и подвижного состава. Эта концепция имеет много общего с ранее разработанной и внедренной (1979 г.) на станции Оффенбург (Германия) системой управления замедлителями тормозной позиции [51]. В этой системе управление процессом торможения происходит с использованием специального регулируемого параметра ( $\Delta V^2$ ), пропорционального изменению кинетической энергии, и описываемого в виде зависящей от пути результирующей функции. При этом для обеспечения точного управления учитываются: нагрузка каждой оси отцепа, количество тормозимых осей, инерционность замедлителей; а также реализован принцип мягкого торможения с регулированием величины тормозного воздействия. Экспериментальные данные показывают, что погрешности реализации заданной скорости выхода с вероятностью 0,9 не превышают 0,25 м/с.

Использование такого принципа управления парковой тормозной позицией является оправданным и целесообразным. Однако для интервальных тормозных позиций мягкий (плавный) режим торможения может не всегда

являться эффективным по условиям разделения отцепов.

Интервальное регулирование представляет собой сложную оптимизационную задачу, окончательно в настоящее время не решенную. Погрешности определения и реализации заданных скоростей выхода в реальных условиях компенсируются за счет запаса начального интервала между отцепами на вершине горки (за счет потери производительности). Эти же погрешности при реализации прицельного регулирования приводят к образованию окон между вагонами на путях накопления или превышению допустимых скоростей соударения, что влечет за собой повреждение грузов и вагонов.

В отличие от интервального регулирования, определение скорости выхода отцепов из парковой тормозной позиции (ПТП) базируется на достаточно простом уравнении, которое является следствием фундаментального закона сохранения энергии:

$$V_{\text{вых}} = \sqrt{V_{\text{кон}}^2 - 2al_x},$$

где  $V_{\text{вых}}$ ,  $V_{\text{кон}}$  – соответственно скорости отцепа в момент выхода из ПТП и в точке прицеливания;

$a$  – ускорение движения вагона на участке после ПТП;

$l_x$  – координата прицеливания.

Основопологающими вопросами реализации прицельного торможения являются определение координаты точки прицеливания  $l_x$  и величины ускорения движения отцепа  $a$  на участке  $l_x$ . Параметр  $a=g'(i-w)10^{-3}$  интегрально включает все составляющие: приведенное ускорение свободного падения  $g'$ , уклон пути  $i$ , суммарную величину удельного сопротивления движению  $w$ , которые вносят множество элементов случайности и достоверно определяются весьма сложно. Опыт эксплуатации автоматизированных сортировочных горок [31-34], а также многочисленные теоретические исследования [7, 52, 53] показывают, что при торможении отцепов с использованием единственной ПТП практически невозможно обеспечить непрерывное заполнение путей сортировочного парка и соблюдение допустимых скоростей соударе-

ния вагонов. Повышение только точности реализации заданных скоростей выхода отцепов из ПТП приводит лишь к незначительному улучшению качества регулирования [53].

Основная проблема заключается в прогнозировании величины ускорения отцепа  $a$  после выхода его из ПТП. Измерение ускорения отцепа на измерительном участке на скоростном уклоне перед ТП и использование полученных данных на ПТП желаемого результата не принесло. Этот алгоритм оказался недееспособным, т.к. условия движения вагонов на измерительном участке и сортировочном пути существенно отличаются, и простая экстраполяция невозможна, что подтверждено в процессе эксплуатации систем АРС ЦНИИ, АРС ГТСС, КГМ.

Необходимость повышения качества прицельного регулирования привела к появлению ряда предложений:

- измерение ходовых свойств непосредственно перед ПТП;
- оборудование на путях дополнительной тормозной позиции (ДТП) и измерение ходовых свойств на участке между ПТП и ДТП;
- использование средств принудительного продвижения вагонов на сортировочных путях (ускорителей, осаживателей);
- совершенствование прицельного торможения на базе адаптивных алгоритмов;
- применение технологии квазинепрерывного регулирования скорости с использованием точечных домкратовидных вагонных замедлителей.

Перечисленное свидетельствует, что в теоретическом и практическом плане задача качественного управления прицельным торможением еще окончательно не решена. Указанные варианты решения проблемы требуют немалых дополнительных затрат и связаны с определенными техническими трудностями, поэтому их внедрению и реализации должны предшествовать предварительные исследования их эффективности. Явно недопустимым является положение, когда неприемлемость технических и технологических решений по автоматизации технологических процессов становится очевидной после

введения и длительной эксплуатации дорогостоящих систем. Это еще раз свидетельствует о необходимости разработки универсальной модели расформирования составов, с помощью которой можно выполнять оценку эффективности технических и технологических решений.

### **1.3. Анализ методов оптимизации процесса расформирования составов**

Показатели работы горки, которые определяют качество сортировочного процесса, существенно зависят от выбора режимов роспуска составов. Оптимальное управление роспуском требует определения таких режимов торможения отцепов, при которых обеспечиваются наилучшие условия их разделения на стрелках, а также выполняются требования прицельного регулирования скорости. В этой связи задача оптимизации режимов торможения отцепов рассматривалась в целом ряде научных работ, в которых использовались различные методы ее решения и разные критерии оптимальности.

Одно из первых решений задачи оптимизации режимов торможения отцепов состава было получено в [31, 54]. В этих работах была предложена математическая модель процесса роспуска, которая связывала время роспуска состава  $T$ , с режимами торможения его отцепов  $\tilde{\gamma}_i$

$$T = b + \sum_{i=1}^n b_i \gamma_i + \sum_{i=1}^{n-1} \delta t_i + b_0 V_0,$$

где  $\delta t_i$  – интервалы между смежными отцепами на разделительных стрелках, с;

$V_0$  – скорость роспуска, м/с.

На базе данной модели была сформулирована задача оптимизации с линейной целевой функцией и нелинейными ограничениями. В результате упрощения задача была сведена к задаче линейного программирования, что позволило устанавливать режимы торможения отцепов состава при заданной постоянной скорости роспуска  $V_0$ . В дальнейшем, варьируя скорость роспуска  $V_0$ , можно установить такие режимы торможения отцепов  $\gamma_i$ , при которых

время роспуска  $T$  будет минимальным и при этом будут выполняться условия интервального регулирования ( $\delta t_i \geq \delta t_{\min}$ ).

Как недостаток полученного решения следует отметить, что процесс режима торможения отдельных отцепов осуществлялся в весьма ограниченной области, которая в действительности значительно шире. Кроме того, не учитывается существенная нелинейная зависимость времени скатывания отцепа при низких скоростях движения.

Задача оптимизации режимов торможения отцепов расчетной группы из трех отцепов поставлена и решена в [55]. Наилучшим с позиций интервального регулирования считается такой режим торможения среднего отцепа, при котором интервалы на ограничивающих разделительных элементах со смежными отцепами одинаковы ( $\delta t_1 = \delta t_2$ ), а их значение максимально. В работе [55] предложен итерационный алгоритм, позволяющий устанавливать скорости выхода отцепа из замедлителей ВТП и СТП, при которых обеспечиваются наиболее благоприятные условия разделения для первой и второй пар отцепов. Недостатком разработанной модели является определенная сложность ее реализации.

В [56] предложено формализованное представление условий функции в задачах оптимизации режимов торможения по условиям интервального регулирования для расчетной группы отцепов П-Х-П:

$$\min\{\delta_{\text{пх}}, \delta_{\text{хп}}\} \rightarrow \max,$$

а также использован графический метод поиска оптимальных значений интервалов  $\delta t$ . Следует заметить, что в данной работе не варьируется степень торможения отцепа Х на парковой тормозной позиции, что существенно сужает область возможных режимов торможения.

Задача оптимизации режимов торможения отцепов состава в нелинейной постановке была решена в [57]. При этом в качестве целевой функции использовался минимальный интервал между отцепами состава.

$$f = \min\{\delta t_i = t_{0i} + t_{i+1}(q_{i+1}) - \tau_i(q_i)\}, i = 1, \dots, n-1 \quad (1.2)$$

Поскольку данная целевая функция  $f$  является нелинейной и негладкой, для решения задачи использовались методы прямого поиска – метод комплексов Бокса и метод случайного поиска, которые не требуют вычисления производных целевой функции. Поиск оптимальных режимов торможения  $q_i$  осуществляется на границе области их допустимых значений, что позволило существенно повысить интервалы между отцепами на разделительных элементах. Однако, как показывает анализ приведенных в [57] результатов оптимизации режимов торможения для нескольких составов, эффективность прямого поиска для решения данной задачи невелика.

Основными недостатками являются недостаточная точность решения, которая, кроме того, зависит от выбора начальной точки, сравнительно большое число итераций, а также то, что метод Бокса не всегда обеспечивает сходимость итерационного процесса.

В работе [58] для решения задачи оптимизации режимов торможения отцепов использовались градиентные методы (метод последовательной безусловной минимизации Фиакко и Мак-Кормика и метод допустимых направлений). Для использования градиентных методов необходимо, чтобы целевая функция (1.2) и ограничения были непрерывными дифференцируемыми функциями. В этой связи сформулированная в [57] задача оптимизации была преобразована в гладкую путем введения дополнительных переменных, имеющей смысл нижней границы для всех  $\delta t_i$  в (1.2); последние в этом случае переходят в ограничения. Вычислительные эксперименты результаты, которых приведены в [58], показали достаточную эффективность метода допустимых исправлений, который обеспечивает сходимость итерационного процесса, гарантирует отсутствие грубых ошибок и требует сравнительно небольшого числа итераций, хотя его алгоритм достаточно громоздкий. Основным же недостатком разработанных в [57, 58] методов является то, что в них принятие решения о выборе режима торможения для каждого отцепа осуществляется только на части состава. При таком подходе действительно максимизируется один (минимальный) интервал  $\delta t$  между отцепами всего состава,

однако не оптимизируется распределение интервалов на других его частях.

Такой подход не позволяет максимально использовать возможности системного подхода и выбор режимов торможения отдельных отцепов состава, который бы позволял минимизировать вероятность их неразделения на разделительных элементах.

Оригинальное решение проблемы совершенствования управления роспуском составов на горках предложено в [39]. Методика поиска режима роспуска состава на математической модели сортировочного процесса, включающей уравнения движения отцепов на участках свободного скатывания, энергетические соотношения между параметрами отцепа и замедлителей, а также характеристики горочных локомотивов по реализации переменной скорости роспуска.

Процедура нахождения рационального плана роспуска осуществляется в несколько этапов. На первом этапе определяются допустимые диапазоны скоростей роспуска и скатывания каждого отцепа в составе, учитывающие требования прицельного регулирования и торможения отцепов замедлителями. На втором этапе определяется начальный ряд скоростей роспуска и скатывания отцепов с учетом коэффициента интенсивности роспуска, который зависит от ситуации на горке и задается оператором на третьем этапе, определяются максимально допустимые скорости отцепов состава, которые обеспечивают требования интервального регулирования и могут быть реализованы горочным локомотивом для данного состава. При необходимости на данном этапе могут корректироваться необходимые режимы движения предыдущих отцепов.

Предложенная методика позволяет определить значения управляющих воздействий на тормозных позициях с учетом требований интервального и прицельного регулирования, а также возможностей горочного локомотива. При этом обеспечиваются допустимые скорости движения состава и отцепов, особенности состояния пути на каждом маршруте скатывания, а также интенсивность работы горки. Следует заметить, однако, что план роспуска, по-

лученный с помощью данной методики, не является оптимальным по условиям оптимального регулирования скорости отцепов, а также не обеспечивает минимального расхода энергии на торможение вагонов замедлителями.

Модель процесса роспуска составов для адаптивной системы управления работой сортировочных горок предложена в [30]. Указанная система осуществляет выбор управляющих воздействий, обеспечивающих роспуск состава за минимальное время с учетом ограничения скорости отцепов и интервалов между ними, а также удовлетворяющих требования интервального и прицельного регулирования. Горка в данной работе рассматривается как бинарное дерево, вершинами и дугами которого составлены длины и уклоны соответствующих участков пути, а также другие необходимые параметры. Движение отцепов в процессе скатывания описывается системой дифференциальных уравнений в конечных разностях. Для учета взаимодействия между скатывающимися отцепами в качестве вектора состояния системы принята совокупность состояния системы отцепов, которая позволяет контролировать интервалы между смежными отцепами. В качестве критерия оптимальности принято время роспуска состава, минимум которого определяется с учетом соблюдения граничных условий и ограничений на фазовые координаты системы. Указанные ограничения позволяют исключить нагоны отцепов, а также обеспечить необходимую дальность пробега отцепов в сортировочный парк и безопасность соударения. В качестве управляющих воздействий на систему приняты моменты отрыва и начальные скорости каждого отцепа, а также удельные тормозные сопротивления замедлителей. Указанную модель предлагается использовать для автоматического управления работой горок произвольной структуры и с разнообразным техническим оснащением. Нужно отметить, что использование в качестве критерия оптимальности времени роспуска в настоящее время нецелесообразно, вследствие существенного сокращения объема переработки вагонов на горках. Кроме того, использование переменной скорости роспуска неэффективно из-за низкой точности ее реализации и незначительного сокращения времени роспуска состава. Наконец,

использование в модели в качестве управляющих воздействий тормозных сопротивлений замедлителей не позволяет варьировать зоны их действия и, следовательно, решать задачи сокращения энергетических расходов при роспуске составов.

Использование в качестве критерия оптимальности сортировочного процесса минимального интервала на стрелках между отцепами состава не всегда обеспечивает высокое качество интервального регулирования, поскольку максимизация минимального интервала не гарантирует оптимального распределения по составу остальных интервалов. Ликвидировать указанный недостаток позволяет многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов торможения отцепов состава, основанный на идеях динамического программирования [59]. Метод позволяет максимизировать не только минимальный интервал  $\delta t_{\min}$ , но и ряд других близких к нему интервалов  $\delta t_i > \delta t_{\min}$  за счет выравнивания их величин с интервалами в смежных парах отцепов состава.

В предложенном методе состав рассматривается как некоторая физическая система  $S$ , пошагово изменяющая свое состояние в процессе роспуска. При этом шагом считается отрыв и скатывание очередного отцепа состояние системы перед  $i$ -м шагом характеризуется временем  $\tau_i$  скатывания  $(i-1)$ -го отцепа за стрелку разделения с  $i$ -м отцепом.

Процесс роспуска является управляемым; управление  $U_i$  на  $i$ -ом шаге характеризуется режимом торможения  $i$ -го отцепа на тормозных позициях по маршруту скатывания. Управление  $U$  роспуском состава из  $n$  отцепов представляется совокупностью шаговых управлений  $U=(U_1, U_2, \dots, U_n)$ . Эффективность управления на отдельных шагах характеризуется величиной интервала  $\delta t_i$  на разделительных стрелках. При этом эффективность управления роспуском всего состава оценивается величиной минимального интервала  $\delta T(U) = \min\{\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_{m-1}\}$ . Тогда задача оптимального управления роспуском состоит в том, чтобы из множества возможных управлений  $U$  найти такое

управление  $U^*$ , которое переводит систему  $S$  из начального состояния (отрыв первого отцепа), в конечное (отрыв последнего отцепа) так, чтобы функционал  $\delta T(U)$  обращался в максимум.

Поиск оптимального управления осуществляется в два этапа, на первом из которых выполняется условная оптимизация, а на втором – безусловная.

Как показали выполненные исследования [59], в процессе оптимизации разработанным методом происходит деление состава на отдельные группы отцепов, для каждой из которых устанавливаются максимально возможные и равные между собой интервалы  $\delta t_i$  на разделительных стрелках. Такой подход позволяет максимизировать интервалы  $\delta t_i$  во всех неблагоприятных по условиям деления группах отцепа состава за счет некоторого их уменьшения в соседних более благоприятных группах. Найденный при этом режим управления позволяет минимизировать в целом по составу вероятность неразделения отцепов на стрелках и за счет этого повысить качество интервального регулирования роспуска состава на горках.

В качестве недостатка метода следует отметить его определенную громоздкость, поскольку разработанный для его реализации алгоритм базируется на численных методах представления функции  $t(U)$ , связывающих время скатывания отцепа с режимом его торможения. Кроме того, данный метод не всегда обеспечивает необходимую точность решения, поскольку целевая функция в данной задаче является негладкой.

#### **1.4. Постановка задачи исследований**

Как показал анализ современного состояния проблемы сокращения энергетических расходов, связанных с расформированием составов на горках, одним из основных путей ее разрешения является оптимизация режимов торможения отцепов, скатывающихся с горки.

Как показал анализ научных работ, посвященных данному вопросу, в настоящее время задача оптимизации режимов скатывания отцепов с горки не решена. Отсутствует возможность получения теоретической оценки минимума затрат энергии, необходимой для роспуска составов, которая необ-

ходима для определения потенциальных возможностей сортировочных горок, как проектируемых, так и действующих. Сложность данной задачи обуславливает необходимость использования для ее решения имитационного моделирования сортировочного процесса. Выполненный обзор публикаций, посвященных имитационному моделированию работы горок, показал, что для нахождения оптимальных режимов торможения отцепов по критерию минимума энергетических расходов, существующие модели горок необходимо усовершенствовать.

Основным направлением совершенствования модели скатывания является процесс торможения отцепа замедлителями. Существующие в настоящее время модели основаны на реализации определенной величины погашаемой энергетической высоты, при которой в пределах всей тормозной позиции на отцеп равномерно действует соответствующее дополнительное тормозное сопротивление. При таком подходе не учитываются многие факторы, которые существенно влияют на скорость и время скатывания отцепов. В связи с этим в данной работе необходимо выполнить формализацию процесса взаимодействия замедлителей разного типа с вагонами и на основе его математического описания разработать имитационную модель торможения отцепов.

Режимы скатывания отцепов существенно зависят не только от параметров замедлителей и вагонов, но и от моментов управляющих воздействий (включения и выключения замедлителей), которые осуществляются в процессе движения отцепа по тормозной позиции. В этой связи в разрабатываемой модели необходимо предусмотреть возможность включения и выключения замедлителей при любом заданном положении отцепа в зоне действия тормозной позиции.

Для оценки эффективности сортировочного процесса и определения энергетических расходов, связанных с роспуском составов, в модель необходимо включить зависимости, которые позволяют определять затраты электроэнергии на регулирование скорости движения отцепов.

Для решения задачи оптимизации режимов роспуска составов с горки, необходимо предварительно выполнить исследования влияния режимов торможения на процесс управляемого скатывания отцепов. С этой целью должен быть выполнен анализ возможных ограничений режимов торможения, связанных с мощностью замедлителей, параметрами отцепов и условиями их скатывания на спускной части горки, а также требованиями прицельного регулирования скорости.

Для обоснованного выбора рациональных значений интервалов между отцепами необходимо исследовать условия их разделения на стрелках и замедлителях при варьировании погашаемой энергетической высоты и моментов управляющих воздействий тормозных позиций. Перечисленные исследования должны быть выполнены на основе вычислительных экспериментов с разработанной имитационной моделью скатывания отцепов с горки.

Для решения задачи сокращения энергетических расходов, связанных с расформированием составов на горках, необходимо разработать методику оптимизации режимов торможения отцепов состава на основе имитационной модели. При этом в качестве критерия оптимальности должны быть приняты энергетические расходы на расформирование; при этом необходимо одновременно обеспечить максимально возможные интервалы между отцепами на разделительных стрелках. Это дополнительное условие позволит минимизировать вероятность неразделения отцепов на стрелках при реализации найденных оптимальных режимов в условиях действия случайных факторов. В тех же случаях, когда указанное условие входит в противоречие с требованиями прицельного регулирования, необходимо найти компромиссное решение, позволяющее обеспечить минимально допустимые интервалы на стрелках и при этом минимизировать образование окон между вагонами.

В заключение должна быть разработана имитационная модель процесса роспуска потока составов на горке. При этом для получения случайного потока расформируемых составов и их отцепов должно использоваться статистическое моделирование параметров отдельных вагонов, а также состояния

сортировочных путей перед роспуском состава.

Модель путевого развития должна включать данные о плане, продольном профиле, разделительных стрелках и замедлителях горки, а также данные о занятии путевых участков объектами подвижного состава. Модель горки должна обеспечивать возможность имитации одновременного движения состава и всех скатывающихся отцепов с помощью дифференциальных уравнений, в которых независимой переменной является время.

В процессе моделирования должны фиксироваться основные технико-эксплуатационные показатели работы горки, а также расход энергоресурсов на торможение вагонов. Это позволит использовать разработанную модель для технико-экономической оценки вариантов конструкции сортировочных горок и поиска энергосберегающих технологических режимов их работы.

## ГЛАВА 2

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ С СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

#### **2.1. Формализация процесса торможения отцепа при скатывании с горки.**

На сортировочных горках разделение маршрутов скатывания отцепов на разделительных стрелках и безопасное соединение вагонов на сортировочных путях обеспечивается путем регулирования скорости скатывания отцепов с использованием для этой цели различных технических средств: замедлителей, ускорителей, тормозных башмаков. Регулирование скатывания отцепов в самом общем виде требует решения двух задач: определение для конкретного отцепа необходимого режима скатывания и реализации этого режима. Каждая из этих задач является самостоятельной, и в тоже время они взаимосвязаны, так как определение режима торможения должно учитывать условия реализации, а реализация зависит от требуемого режима. В этой взаимосвязи первоочередной для исследования является задача реализации некоторого заданного режима скатывания, решение которой требует формализации и математического описания процесса взаимодействия отцепа с техническими средствами регулирования скорости движения отцепа.

В настоящее время на сортировочных устройствах железнодорожных станциях Украины в качестве технических средств для регулирования скорости скатывания отцепов применяются балочные вагонные замедлители различных типов [4] и ручные тормозные башмаки. В этом случае регулирование скорости скатывания отцепов можно рассматривать как процесс торможения, т.е. движения отцепа в условиях воздействия сил сопротивления движению, создаваемых тормозными средствами. В существующих методиках математического описания процесса скатывания отцепа это воздействие принято учитывать величиной действующего на отцеп удельного тормозного сопротивления:

$$w_T = \frac{W_T}{Q_{отц}} \cdot 10^3 \text{ (кгс/тс)}, \quad (2.1)$$

где  $W_T$  – полная величина действующей на отцеп тормозной силы, тс;

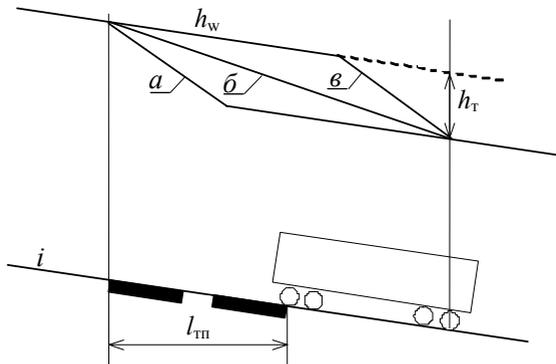
$Q_{отц}$  – вес отцепа, тс.

При этом проблемой является определение величины  $W_T$  (следовательно, и  $w_T$ ), зависящей от множества факторов, окончательно не изученных и не формализованных. В связи с этим, при выполнении научно-технических расчетов и исследованиях процессов расформирования составов [37, 38] величина  $w_T$  устанавливается косвенным путем – с использованием погашаемой на замедлителях (тормозной позиции) энергетической высоты ( $h_T$ , м эн. в.) – и определяется как

$$w_T = \frac{h_T}{l_{р.тп}} \cdot 10^3 \text{ (кгс/тс)}, \quad (2.2)$$

где  $l_{р.тп}$  – рабочая длина тормозной позиции, м.

Такой подход можно считать допустимым при описании процесса скатывания отцепа в энергетическом представлении (рис. 2.1) и выполнении расчетов потребной мощности или проверки достаточности наличной мощности тормозных средств на горке.

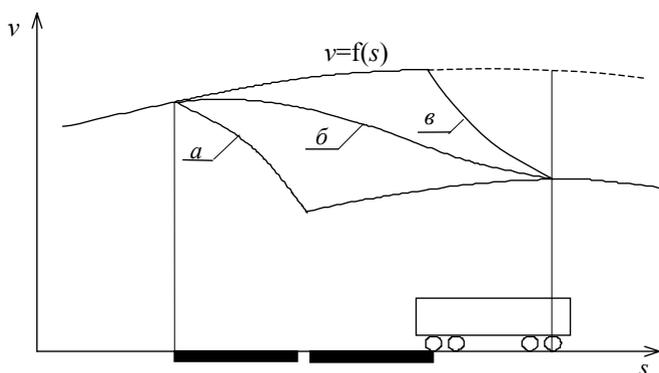


**Рисунок 2.1.** - Процесс торможения вагона в энергетическом виде

В этом случае интенсивность торможения (варианты  $a$ ,  $б$ ,  $в$ ) не влияет на результаты расчетов. Вместе с тем, интенсивность торможения оказывает

существенное влияние на скорость скатывания отцепа, характер изменения которой может иметь изображенный на рис. 2.2 вид.

Различия в характере изменения скорости скатывания отцепа влекут за собой изменения продолжительности скатывания  $t$ , которая является важнейшим фактором при выполнении технологических расчетов, связанных с проверкой условий разделения скатывающихся отцепов. Отсюда вытекает необходимость детального учета факторов, определяющих взаимодействие тормозных средств с вагоном, с целью адекватного описания процесса торможения.



**Рисунок 2.2** - Характер изменения скорости вагона при различных режимах торможения

В общем случае действующая на отцеп тормозная сила зависит от множества факторов: детерминированных (параметры замедлителя и отцепа) и случайных (состояния ходовых частей вагонов, замедлителей, окружающей среды), в связи с чем является случайной величиной. При этом непосредственно измерение величины  $W_T$  в эксплуатационных условиях связано с определенными трудностями и практически невозможно. Этим объясняется тот факт, что единственной характеристикой тормозных свойств замедлителей в современных условиях является их мощность  $H_3$  – погашаемая удельная энергия при полном торможении 4-осных полногрузных вагонов [4, 5]. Последняя представляет собой удельную работу тормозных сил при проходе всех колесных пар вагона по заторможенному замедлителю, т.е.

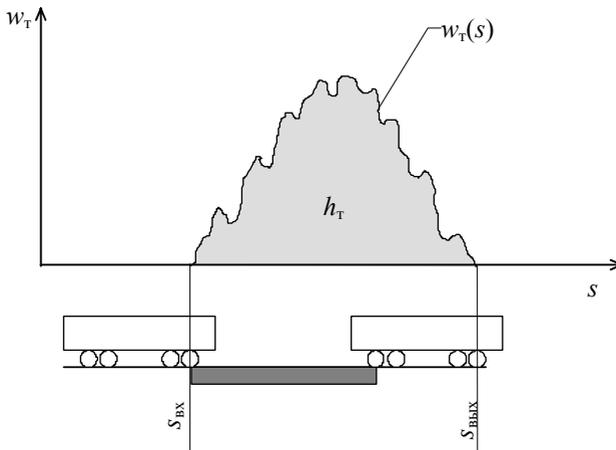
$$H_3 = \sum_{s_{\text{вх}}}^{s_{\text{вых}}} w_T(s) \Delta s_i \cdot 10^{-3}; \quad (2.3)$$

$$\sum \Delta s_i = s_{\text{вых}} - s_{\text{вх}},$$

где  $s_{\text{вх}}, s_{\text{вых}}$  – координаты пути, соответствующие входу и выходу вагона из замедлителя;

$\Delta s_i$  – элементарный отрезок пути с постоянной величиной  $w_T$ , м.

Теоретические [60-62] и экспериментальные [63, 64] исследования показывают, что для балочных замедлителей характерно изменение  $w_T$  по мере продвижения вагона по заторможенному замедлителю. Объясняется это изменением количества одновременно находящихся на замедлителе колес, перекосом тормозных балок и нестабильностью коэффициента трения при взаимодействии шин замедлителя с колесами вагона. Эти причины приводят к тому, что  $w_T(s)$  имеет нестабильный, случайный характер (рис. 2.3), поэтому установление функциональной зависимости  $w_T=f(s)$  практически невозможно.



**Рисунок 2.3** - Характер изменения удельной тормозной силы при торможении вагона

В силу указанных причин какая-либо формализация этого процесса является приближенной, и может характеризоваться лишь степенью адекватности, зависящей от количества учитываемых факторов.

По способу создания тормозного эффекта различают замедлители весового и нажимного типа, а по конструкции – балочные и точечные. Принцип их действия, определяющий процесс взаимодействия с вагоном, является важнейшим фактором, который необходимо учитывать при формализации.

### 2.1.1. Балочные замедлители весового типа.

Теоретически [60] для балочных замедлителей весового типа тормозящая сила, действующая на вагон при торможении его одной колесной пары (оси), может быть определена как

$$F_{т.ос} = 2q_{в} k_{пер} \varphi_{пр} \mu, \quad (2.4)$$

где  $q_{в}$  – нагрузка от одной оси вагона;

$k_{пер}$  – коэффициент передачи механизма замедлителя;

$\varphi_{пр}$  – коэффициент приведения, зависящий от параметров замедлителя и диаметра колес вагона;

$\mu$  – коэффициент трения.

Удельная величина силы  $F_{т.ос}$ , приходящейся на единицу веса вагона, составит:

$$f_{т.ос} = \frac{F_{т.ос}}{Q_{в}} = \frac{2q_{в} k_{пер} \varphi_{пр} \mu}{Q_{в}} = \frac{2k_{пер} \varphi_{пр} \mu}{n_{в}}, \quad (2.5)$$

где  $Q_{в}$ ,  $n_{в}$  – соответственно вес и число осей вагона.

Теоретически постулируется (см. например [60]), что при одновременном нахождении на замедлителе нескольких осей вагона  $n_{0,3}$ , каждая из них испытывает тормозную силу  $F_{т.ос}$ , поэтому удельную величину действующей на вагон тормозной силы принято определять пропорционально количеству тормозимых осей, т.е.

$$w_{т} = n_{0,3} f_{т.ос}. \quad (2.6)$$

Исходя из этого, изменение  $w_{т}$  в процессе передвижения вагона по заторможенному замедлителю можно представить в графическом виде (рис. 2.4). Тогда удельная работа тормозных сил (мощность) замедлителя может быть рассчитана как

$$H_3 = n_{\text{в}} f_{\text{т.ос}} l_3 \quad (2.7)$$

Из (2.7) следует, что мощность замедлителя прямо пропорциональна количеству осей вагона. Между тем, результаты экспериментальных исследований [64] показывают, что с увеличением числа осей вагона мощность замедлителя также повышается. Однако зависимость между этими параметрами нелинейная. В табл. 2.1 приведены основные характеристики весовых замедлителей КВ-3 и ЦНИИ-3В, полученные экспериментально для вагонов с различным количеством осей [64].

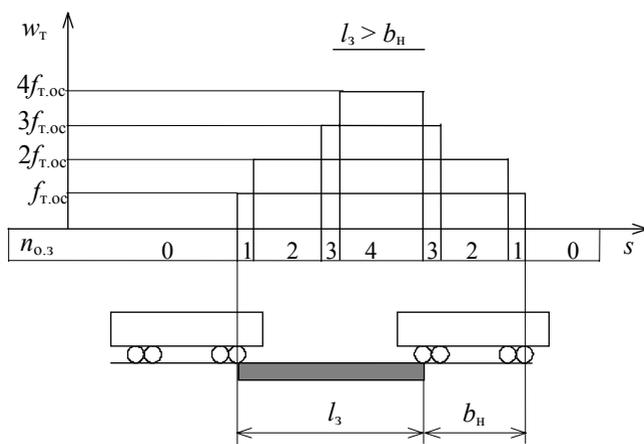


Рисунок 2.4 - Диаграмма расчетной удельной тормозной силы нажимных и весовых замедлителей

Таблица 2.1

### Технико-эксплуатационные характеристики весовых замедлителей

Параметры замедлителей		Значения параметров для замедлителей	
		КВ-3	ЦНИИ-3В
Длина по балкам, $l_3$ , м		7,6	3,2
Мощность, $H_3$ , м э. в., при торможении полногрузных вагонов	4-осных	1,10	0,28
	6-осных	1,34	0,35
	8-осных	1,46	0,43
Удельная тормозная сила, $f_{\text{т.ос}}$ , кгс/тс, при торможении полногрузных вагонов	4-осных	36,2	21,9
	6-осных	29,4	18,2
	8-осных	24,0	16,8

Явление уменьшения удельной тормозной силы  $f_{т.ос}$  при увеличении числа осей в тележке объясняется изменением условий взаимодействия балок замедлителя с колесами вагона, нарушением весового режима в связи с увеличением удельного давления на опорные шины, но теоретически в настоящее время не описано.

В результате, свойство стабильности величины  $f_{т.ос}$  можно применить только по отношению к вагонам определенного (по числу осей) типа. Используя данные номинальной мощности замедлителя (или ее отдельного случайного значения) для вагонов определенного типа  $H_{3,n}$  из (2.7) можно определить величину  $f_{т.ос}$  (кгс/тс):

$$f_{т.ос} = \frac{H_{3,n}}{n l_3} 10^3. \quad (2.8)$$

Таким образом, при моделировании процесса торможения отдельного вагона мгновенное значение удельной тормозной силы весового замедлителя можно определить как

$$w_T = \sum_{j=1}^{n_{ос}} f_{т.осj}. \quad (2.9)$$

Для отцепов из нескольких вагонов различного (по числу осей) типа и различного веса мгновенное значение удельной тормозной силы весового замедлителя можно определить следующим образом

$$w_T = \sum_{j=1}^{n_{ос}} \frac{H_{3,n} q_{Bj}}{l_3 Q_{отц}} 10^3. \quad (2.10)$$

Выражение (2.10) позволяет при моделировании скатывания отцепа вычислять величину удельной тормозной силы весовых замедлителей на элементарном перемещении ( $\Delta s$ ) и учитывает следующие факторы:

- нагрузку тормозимой оси  $q_{Bj}$ ;
- номинальную мощность замедлителя для вагонов соответствующего типа  $H_{3,n}$ ;
- положение отцепа относительно замедлителя.

Учет других факторов (скорость отцепа, давление рабочего тела в тормозных цилиндрах, параметры и состояния колесных пар, изменение коэффициента трения и т.п.) в настоящее время невозможен по причине отсутствия теоретических обоснований и экспериментальных данных.

### 2.1.2. Балочные замедлители нажимного типа

Для балочных двухрельсовых замедлителей нажимного типа тормозящая сила, действующая на вагон при торможении его одной колесной пары, теоретически [60] может быть определена как

$$F_{\text{т.ос}} = 4F_{\text{д}}\mu\varphi_{\text{пр}}, \quad (2.11)$$

где  $F_{\text{д}}$  – сила давления тормозной балки на боковую поверхность колеса.

Удельная величина этой силы, приходящейся на единицу веса, составит:

$$f_{\text{т.ос}} = \frac{4F_{\text{д}}\mu\varphi_{\text{пр}}}{Q_{\text{в}}}, \quad (2.12)$$

а погашаемая энергетическая высота (мощность) замедлителя для вагона с числом осей  $n_{\text{в}}$

$$H_3 = \frac{4F_{\text{д}}\mu\varphi_{\text{пр}}l_3n_{\text{в}}}{Q_{\text{в}}}. \quad (2.13)$$

Учитывая, что  $q_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}}}{n_{\text{в}}}$ , выражение (2.13) можно записать в виде

$$H_3 = \frac{4F_{\text{д}}\mu\varphi_{\text{пр}}l_3}{q_{\text{в}}}. \quad (2.14)$$

Из (2.14) следует, что тормозная мощность балочного нажимного замедлителя зависит только от нагрузки на ось вагона и не зависит от количества его осей. Результаты экспериментальных исследований [64], приведенные в табл. 2.2 для полногрузных вагонов, опровергают это утверждение – тормозная мощность нажимных замедлителей уменьшается с увеличением числа осей вагона.

В связи с отсутствием аналитического описания зависимости  $H_3=f(n_v)$ , в модели процесса торможения следует номинальную мощность замедлителя принимать отдельно для каждого типа вагонов  $H_{3,л}$ .

Как следует из (2.13), у замедлителей нажимного типа погашаемая энергетическая высота обратно пропорциональна весу вагона. Принимая во внимание, что номинальная мощность замедлителей  $H_{3,л}$  нормируется для полногрузных вагонов  $Q_{в.пн}$ , ее величину для вагонов произвольного веса  $Q_v$  можно определить как

$$H_{3,qv} = \frac{H_{3,л} Q_{в.пн}}{Q_v}. \quad (2.15)$$

Таблица 2.2

Технико-эксплуатационные характеристики нажимных замедлителей

Параметры замедлителей		Значения параметров для замедлителей		
		Т-50	КНП-5	РНЗ-71М
Длина по балкам, $l_3$ , м		12,48	12,48	3,60
Мощность, $H_{3,л}$ , м эн. в., при торможении полногрузных вагонов	4-осных	0,797	1,290	0,408
	6-осных	0,692	0,995	0,333
	8-осных	0,589	0,832	0,330
Удельная тормозная сила, $f_{т.ос}$ , кгс/тс, при торможении полногрузных вагонов	4-осных	16,0	25,8	28,3
	6-осных	9,2	13,3	15,4
	8-осных	5,9	8,3	11,5

У нажимных замедлителей сила давления тормозных балок на боковую поверхность колеса  $F_d$  зависит от давления рабочего тела в тормозных цилиндрах  $p_{тц}$ . Согласно законам физики и механики, давление балок прямо пропорционально давлению в тормозных цилиндрах, т.е.

$$F_d = k_{пер} S_{п.тц} p_{тц}, \quad (2.16)$$

где  $k_{пер}$  – коэффициент передачи рычажной системы;

$S_{п.тц}$  – площадь поршня тормозного цилиндра.

Учитывая, что некоторая часть  $p_o$  общего давления  $p_{тц}$  расходуется на подъем (перемещение) массы тормозной системы, получим

$$F_d = k_{пер} S_{п.тц} (p_{тц} - p_o). \quad (2.17)$$

Так как  $k_{\text{пер}}$  и  $S_{\text{п.тц}}$  для замедлителей конкретного типа являются величинами постоянными, то согласно (2.13) его мощность прямо пропорциональна давлению в тормозных цилиндрах. Следовательно, тормозную мощность замедлителя для вагонов определенного типа при некотором давлении рабочего тела в тормозных цилиндрах  $p_{\text{тц}}$  можно определить как

$$H_{3, \text{нр}} = \frac{H_{3, \text{н}}(p_{\text{тц}} - p_0)}{(p_{\text{нтц}} - p_0)}, \quad (2.18)$$

где  $p_{\text{нтц}}$  – номинальное давление в тормозных цилиндрах, которому соответствует номинальная мощность.

Экспериментальные испытания нажимных замедлителей [64] показывают наличие зависимости их тормозной мощности от давления в тормозных цилиндрах, и подтверждает правомерность аналитического описания этой зависимости выражением (2.18). Рассматривая совместно (2.15) и (2.18), можно получить выражение для определения реализуемой замедлителем мощности для вагона произвольного веса при заданном давлении  $p_{\text{тц}}$  в тормозных цилиндрах:

$$H_{3, \text{нр}q} = \frac{H_{3, \text{н}} Q_{\text{в.пн}} (p_{\text{тц}} - p_0)}{Q_{\text{в}} (p_{\text{нтц}} - p_0)}. \quad (2.19)$$

При этом средняя величина удельной тормозной силы, действующей на вагон от одной тормозимой оси, составит

$$f_{\text{т.ос}} = \frac{H_{3, \text{н}} Q_{\text{в.пн}} (p_{\text{тц}} - p_0)}{n_{\text{в}} l_{\text{в}} Q_{\text{в}} (p_{\text{нтц}} - p_0)}. \quad (2.20)$$

Для многовагонного отцепа величина  $f_{\text{т.ос}}$  при торможении отдельной оси  $i$ -го вагона может быть определена как

$$f_{\text{т.ос}} = \frac{H_{3, \text{н}} Q_{\text{в.пн}i} (p_{\text{тц}} - p_0)}{n_{\text{в}} l_{\text{в}, i} Q_{\text{в}, i} (p_{\text{нтц}} - p_0)}. \quad (2.21)$$

Мгновенное значение действующей на отцеп удельной тормозной силы нажимного замедлителя можно определять с помощью (2.9).

Для исключения выжимания замедлителями колесных пар вагонов сила давления тормозных балок на боковую поверхность колес  $F_{\text{д}}$  не должна превышать нагрузку от колесной пары на рельсы  $q_{\text{в}}$  более чем в 3 раза [5].

Таким образом, моделирование процесса торможения для нажимных замедлителей можно представить как последовательное выполнение следующих этапов:

- определение нагрузки колесной пары отцепа  $q_{в}$ ;
- выбор ступени торможения и соответствующего давления в тормозных цилиндрах  $p_{тц}$ ;
- вычисление с помощью (2.21) мгновенного значения удельной тормозной силы  $f_{т.ос}$ ;
- вычисление с помощью (2.9) удельной тормозной силы  $w_{т}$ .

### 2.1.3. Балочные замедлители со стабильной тормозной характеристикой

Замедлители с плоско-параллельной кинематической схемой (РНЗ-2) характеризуются стабильностью действующей на вагон тормозной силы независимо от числа тормозимых осей [62]. Расчетная диаграмма изменения величины  $w_{т}$  в процессе прохождения вагона по заторможенному замедлителю имеет изображенный на рис. 2.5 вид. Удельная работа тормозных сил (мощность, м эн. в.) замедлителя определяется как

$$H_3 = w_{т} L_{рзт} 10^{-3}, \quad (2.22)$$

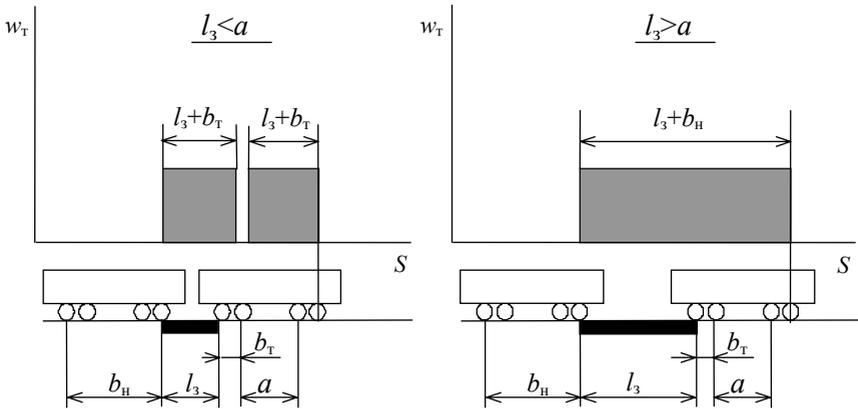
где  $L_{рзт}$  – рабочая длина зоны торможения, м.

Согласно приведенным на рис. 2.5 расчетным схемам, величину  $L_{рзт}$  следует определять с учетом соотношения длины замедлителя  $l_3$  и расстояния между внутренними колесными парами смежных тележек  $a$  вагона, а именно:

$$L_{рзт} = \begin{cases} 2(l_3 + b_t) & \text{- если } l_3 < a; \\ l_3 + b_n & \text{- если } l_3 \geq a, \end{cases} \quad (2.23)$$

где  $b_t$  – база тележки вагона, м;

$b_n$  – база вагона по наружным осям, м.



**Рисунок 2.5** - Диаграмма расчетной удельной тормозной силы замедлителей со стабильной тормозной характеристикой

Для замедлителей этого типа, как нажимных, справедлива зависимость (2.19) реализуемой мощности от веса вагона и давления в тормозных цилиндрах. Исходя из (2.19) и (2.22), можно определить среднюю величину удельной тормозной силы (Н/кН), действующей на вагон при нахождении на замедлителе хотя бы одной оси ( $n_{o,3} > 0$ ):

$$w_{\Gamma} = \frac{H_{3,л} Q_{в.пл} (p_{тц} - p_o)}{L_{рзт} Q_{в} (p_{нтц} - p_o)} 10^3. \quad (2.24)$$

Для многовагонного отцепа мгновенная величина удельной тормозной силы при наличии на замедлителе любого числа осей ( $n_{o,3} > 0$ ) может быть определена как, (Н/кН)

$$w_{\Gamma} = \frac{H_{3,л} Q_{в.пл} (p_{тц} - p_o)}{L_{рзт} Q_{отц} (p_{нтц} - p_o)} 10^3. \quad (2.25)$$

Результаты экспериментальных испытаний замедлителей РНЗ-2 [65] подтверждают правомерность выражения (2.25) и возможность его использования при моделировании процесса торможения отцепов замедлителями рассматриваемого типа.

## 2.2. Методика расчета энергетических расходов, связанных с торможением вагонов

Процесс торможения вагонов при скатывании их с сортировочной горки требует приложения внешней силы, создающей сопротивление движению. На образование этой силы расходуются определенные энергоресурсы. Для приведения в действие пневматических замедлителей используется сжатый воздух, на производство которого затрачивается электрическая энергия.

Расход воздуха на торможение отдельного отцепа зависит от множества факторов:

- параметров горки (высота, продольный профиль, количество и тип замедлителей);
- параметров отцепа (количество и масса вагонов, удельное сопротивление движению);
- условий скатывания (скорость роспуска, температура воздуха, скорость и направление ветра, дальность скатывания, стрелки разделения со смежными отцепами);
- режима торможения (распределение погашаемой энергетической высоты между тормозными позициями, количество включений замедлителей).

Множество влияющих факторов и сложные взаимодействия между ними затрудняют адекватное описание расхода воздуха на торможение отцепа. В связи с этим существующие методы нормирования расхода энергоресурсов [5], [20], [66] основаны на статистических данных реально функционирующих горок и теоретически не обоснованы. В качестве основного норматива расходования электроэнергии на горке применяется удельный расход электрической энергии на единицу погашаемой энергетической высоты вагона  $\epsilon_n$ , кВт·ч/м эн. в.

При многопозиционном торможении и нескольких замедлителях на каждой позиции погашение определенной энергетической высоты скатывающегося отцепа может быть реализовано неоднозначно, различными вариантами, отличающимися количеством включений замедлителей и расходом

воздуха. Указанный норматив  $\varepsilon_n$  не учитывает перечисленные выше влияющие факторы, носит усредненный для отцепов и условий скатывания характер и не может быть использован для объективного определения расходов по торможению конкретного отцепа в конкретных условиях. Кроме того, нормативы, основанные на статистических данных, включают утечки воздуха, непроизводительную работу компрессоров и не отражают объективный расход воздуха непосредственно на торможение.

Объективно расход воздуха при включении замедлителя связан с заполнением емкости тормозных цилиндров и разводящей пневмосети между воздухохраником и цилиндрами  $V_{цс}$ . Включение замедлителя на определенной ступени торможения  $z$  при давлении  $p_{тиз}$  соответствует расходу свободного воздуха в количестве  $P_{св} = V_{цс} p_{тиз}$ . Данные о емкости подводящей пневмосети и тормозных цилиндров замедлителей приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Емкость подводящей пневмосети и тормозных цилиндров замедлителей

Тип замедлителя	КВ-3	КНП-5	Т-50	ВЗПГ-5	РНЗ-2
Объем питающей сети, $V_{цс}$ , м <sup>3</sup>	0,243	0,214	0,143	0,029	0,029

Расход электроэнергии на одно срабатывание (включение) замедлителя можно определить как

$$E_{вкл} = P_{св} \varepsilon_{св},$$

где  $\varepsilon_{св}$  – удельный расход электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> свободного воздуха, кВт·ч/м<sup>3</sup>.

В чистом виде (без расходов на вспомогательные нужды, непроизводительную работу компрессоров и утечки воздуха) величину  $\varepsilon_{св}$  можно определить с использованием технических характеристик компрессоров следующим образом

$$\varepsilon_{св} = \frac{N_{дк}}{60P},$$

где  $N_{\text{дк}}$  – мощность двигателя компрессора, кВт;

$\Pi$  – производительность компрессора, м<sup>3</sup>/мин.

Технические характеристики компрессоров и удельный расход электроэнергии приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Технические характеристики компрессоров

Показатель	Значение показателя для компрессоров				
	305ВП	2ВМ5	ВП3	2ВМ2,5	ВП2
Мощность двигателя, $N_{\text{дк}}$ , кВт	160	160	125	85	75
Производительность, $\Pi$ , м <sup>3</sup> /мин	30	27	22	14	11
Удельный расход электроэнергии, $\varepsilon_{\text{св}}$ , кВт·ч/м <sup>3</sup>	0,089	0,099	0,095	0,101	0,114

Данные табл. 2.4 показывают, что удельный расход электроэнергии колеблется в зависимости от типа компрессоров в пределах от 0,09 до 0,11 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Таким образом, расходы электроэнергии, связанные с торможением отдельного отцепа при скатывании его с горки, могут быть определены как

$$E_{\text{отц}} = \varepsilon_{\text{св}} \sum_{i=1}^{K_{\text{вкл}}} V_{\text{отц}i} p_{\text{тлц}i},$$

где  $K_{\text{вкл}}$  – количество включений замедлителей для торможения отцепа по маршруту его скатывания.

Расходы на электроэнергию для торможения вагонов отдельного состава можно определить по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{эт}} = c_{\text{эл}} \sum_{j=1}^{k_{\text{с}}} E_{\text{отц}j}, \quad (2.26)$$

где  $c_{\text{эл}}$  – стоимость 1 кВт·ч электрической энергии, грн/кВт·ч;

$k_{\text{с}}$  – количество отцепов в составе.

Выражение (2.26) можно рассматривать как целевую функцию при решении задач оптимизации регулирования скорости скатывания отцепов. Оптимизируемыми факторами при этом являются режимы торможения отцепов

$h_t$	$L_{t \text{ min}}$	$L_{t \text{ max}}$	$s_{\text{хв}}$	$D_{\text{тп}}$
м эн. в.	М	М	М	осе-м
1,20	22,98	22,98	0	49,90
0,90	14,89	15,89	7,16	37,73
0,60	8,65	11,49	15,82	24,95
0,30	3,50	7,16	15,82	12,48

Показатели зонного торможения вагона нажимным замедлителем

Показатели зонного торможения вагона нажимным замедлителем

Таблица 2.7

Колесная возможная значения  $L_t$  при реализации определенных значений  $h_t$  объясняется различным количеством осей, подвешенных к торможению. Очевидно, что износ замедлителя связан не только с длиной зоны торможения  $L_t$ , но и с количеством тормозных осей. Поэтому для оценки степени износа замедлителей необходимо использовать показатель, который бы отражал оба влияющих фактора – длину зоны торможения и количество тормозных осей.

При различных значениях  $h_t$  приведены в табл. 2.7. Числовые значения  $s_{\text{тп}}$  от координаты начала торможения  $L_t$  до  $L_{t \text{ min}}$  в зависимости  $h_t$  существует область допустимых значений  $L_t$  от  $L_{t \text{ min}}$  до  $L_{t \text{ max}}$  в зависимости от полученных результатов показывающих, что для определения значения

Рисунок 2.11 - Графическое представление функции  $L_t = f(h_t; s_{\text{тп}})$

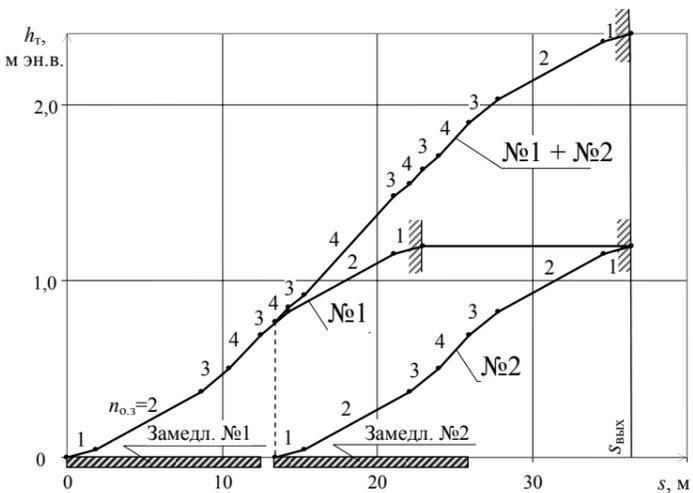
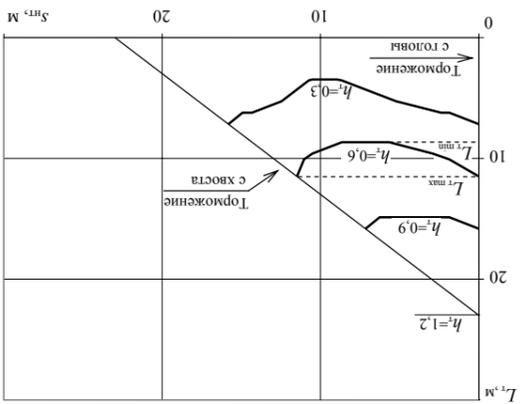


Рисунок 2.13 - Варианты режимов торможения двумя замедлителями

Основные показатели процесса торможения вагона двумя замедлителями приведены в табл. 2.9 и в графическом виде на рис. 2.14.

Таблица 2.9

Показатели зонного торможения вагона двумя замедлителями

$h_t$ , м эн. в.	$L_{t \text{ min}}$ , М	$L_{t \text{ max}}$ , М	$s_{\text{хв}}$ , М	$D_{\text{тп}}$ , осе-м
0,60	6,38	11,49	24,96	24,95
1,20	13,48	18,23	18,22	49,90
1,80	22,13	24,96	11,49	74,85
2,40	36,45	36,45	0	99,80

Последние результаты показывают, что реализация некоторой величины  $h_t < H_s$  возможна с использованием различного количества замедлителей на позиции. Количество используемых для торможения замедлителей  $K_{из}$  влияет на расходы, связанные с торможением, и является еще одним фактором, требующим учета при решении задачи оптимизации процесса расформирования.

Указанные факторы  $h_t, s_{\text{тп}}, K_{из}$  оказывают влияние на скорость скатывания отцепа. Для оценки этого влияния рассмотрим процесс торможения рас-

$\varphi^n$  – угол поворота кривой  $n$ -го элемента, град.

стрелка);

Здесь  $\theta^n$  – тип  $n$ -го элемента в модели пути скатывания ( $\theta^n=0$  – кривая;  $\theta^n=1$  –

$$C_{\text{ск}} = \frac{l_{\text{скн}}}{0,56\theta^n + 0,23\varphi^n}, \text{ если } s_j \in [s_{\text{скн}}, s_{\text{скн}} + l_{\text{скн}}], \text{ иначе } C_{\text{ск}}=0.$$

Значение  $C_{\text{ск}}$  для  $i$ -й оси отцепа в (2.29) зависит от координаты ее по-

ложения  $s_j$  на пути скатывания и определяется как

Значение  $C_{\text{ск}}$  для  $i$ -й оси отцепа в (2.29) зависит от координаты ее по-

$$C_{\text{ск.ск}} = \sum_{j=1}^f b_j \sum_{i=1}^m C_{\text{ск}} \quad (2.29)$$

отцепа на пути скатывания:

Величина  $C_{\text{ск.ск}}$  является кусочно-постоянной функцией положения осей

вых.

где  $C_{\text{ск.ск}}$  – средневзвешенный коэффициент сопротивления стрелок и кривых

$$w_{\text{ск}}(v) = C_{\text{ск.ск}} v^2$$

жесткая отцепа, так и от его скорости:

Сопротивление движению от стрелок и кривых  $w_{\text{ск}}$  зависит как от поло-

$s_j$  – угол спайна ( $s_j < s_j < s_j + 1$ ).

где  $C_{\text{ск.ск}}$  – коэффициент спайна;

$$i(s_j) = C_{\text{ск.ск}} (s_j - s_j) + 2C_{\text{ск.ск}} (s_j - s_j)^2 + 3C_{\text{ск.ск}} (s_j - s_j)^3$$

горки  $h(s_j)$ , представляющего кубическим спайном [72]:

Уклон  $i(s_j)$  представляет собой первую производную отметки профили

$i(s_j)$  – значение уклона, на котором находится  $i$ -я ось  $j$ -го вагона.

$s_j$  – координата точки, в которой находится  $i$ -я ось  $j$ -го вагона.

$G_{\text{отп}}$  – вес отцепа;

состава, выраженные количеством включений замедлителей с учетом ограничений интервального и прицельного регулирования скорости скатывания отцепов.

Другой составляющей расходов, связанных с торможением вагонов, являются затраты на ремонт и восстановление замедлителей в части, зависящей от процесса торможения. Расходы на ремонт и восстановление замедлителей можно считать пропорциональными количеству включений замедлителей  $K_{\text{вкл}}$  и развернутой длине торможения  $D_{\text{тп}}$ , выраженной в осе-метрах. С использованием расходных ставок на одно включение  $e_{\text{вкл}}$  и один осе-метр  $e_{\text{рв}}$ , расходы на ремонт и восстановление в расчете на один расформированный состав можно определить как

$$E_{\text{рв}} = \sum_{j=1}^{k_{\text{с}}} \left( \sum_{i=1}^{K_{\text{вкл}j}} e_{\text{вкл}ji} + \sum_{i=1}^{K_{\text{рв}j}} e_{\text{рв}ji} D_{\text{тп}ji} \right) \quad (2.27)$$

В настоящее время величины расходных ставок  $e_{\text{вкл}}$  и  $e_{\text{рв}}$ , а также методики их калькуляции отсутствуют, что затрудняет нормирование расходов на ремонт замедлителей. Учет этой составляющей в целевой функции (2.26) позволит повысить качество и объективность результатов оптимизации.

### 2.3. Совершенствование имитационной модели скатывания отцепа с горки

По результатам исследований, приведенных в данной главе, построена имитационная модель процесса скатывания отцепов с горки и выполнена ее программная реализация. С этой целью была усовершенствована модель [38] с равномерным торможением отцепов на тормозных позициях. При этом были использованы более современные методы решения дифференциального уравнения движения отцепов [74], а также реализована разработанная модель торможения отцепов, обеспечивающая адекватную имитацию работы тормозных позиций горки.



Регулирование движения отцепа на тормозной позиции осуществляется в реализации некоторого режима торможения, который может быть задан тремя параметрами: скоростью выхода отцепа из тормозной позиции  $n_3$  или величиной удельной работы сил торможения  $h_3$ . Реализация определенного режима является сложной задачей с многочисленными факторами и множественным решением, от которых зависят показатели процесса торможения и результаты скатывания отцепа. Оценка влияния этих факторов на показатели процесса скатывания отцепа.

#### 2.4. Исследование влияния режимов торможения на показатели процесса скатывания отцепа.

Общий вид соответствующих окон приведены в Приложении А. Полный перечень функций и возможностей программы VS.exe и ролирования режимов торможения.

В результате моделирования получают значения  $s, v, t$  в конечных точках (точка отрыва отцепа от состава, границы изолированных участков раздельных стрелок и тормозных позиций, точка прицепки вагона) и в точках, кратных шагу моделирования. Кроме того, на экране дисплея вычерчиваются графики скорости  $v=f(s)$  и времени  $t=f(s)$  скатывания отцепа с горки, используемые для анализа результатов моделирования и корректировки параметров моделирования.

Режим торможения (энергетическая высота, поташаемая на каждой фазе) в табличной форме, либо подготовлены заранее в виде текстовых файлов.

Разработана имитационная модель скатывания в виде программы VS.exe. Исходные данные о горке, об отцепах и о режиме скатывания, необходимые для моделирования, могут быть введены непосредственно из программы.

#### 2.3.5. Программная реализация имитационной модели скатывания отцепа

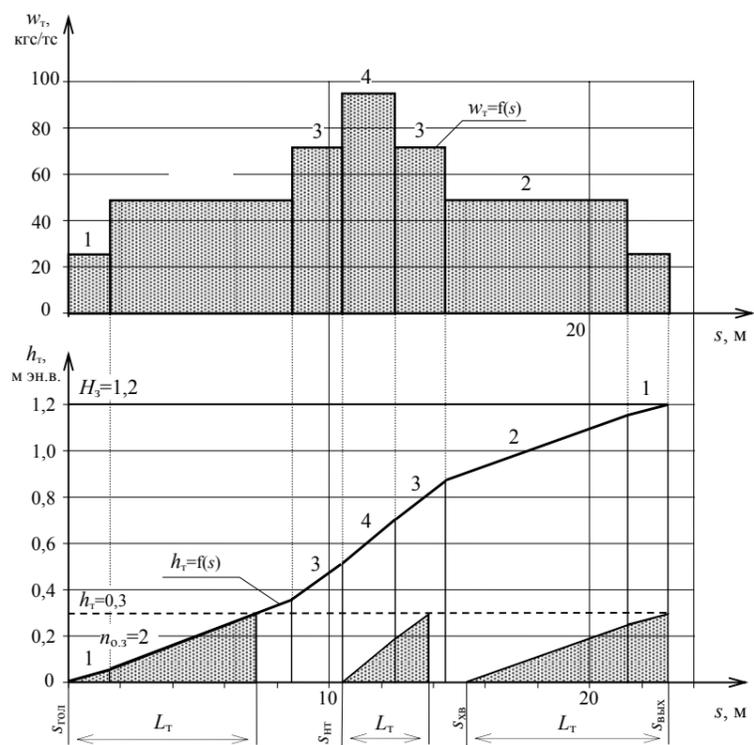


Рисунок 2.10 - Диаграммы изменения показателей процесса торможения

$$s_{гол} \leq s_{ит} \leq s_{хв} \quad (2.36)$$

Длина зоны торможения  $L_T$ , т.е. расстояние, которое проходит отцеп в процессе торможения, является одним из показателей, с помощью которого можно оценивать износ тормозных шин и колес вагона, что является одной из составляющих расходов, связанных с торможением.

Исходя из (2.35), длина зоны торможения является функцией  $L_T=f(h_{от}, s_{ит})$ . Аналитическое описание этой функции не представляется возможным, поэтому с целью анализа выполнены расчеты ее отдельных значений с помощью модели процесса торможения, результаты которых приведены в графическом виде на рис. 2.11.

При этом величина  $w_{от}$  находится в зависимости от скорости  $v$  и относительной скорости отцепа  $w_{от}$  ( $w_{от} = v - v_{вет}$ ) и числитель (2.28) становится равным  $w_{от}^2$ . При этом величина  $w_{от}$  находится в зависимости от скорости  $v$  и относительной скорости отцепа  $w_{от}$  ( $w_{от} = v - v_{вет}$ ) и числитель (2.28) становится равным  $w_{от}^2$ . При этом величина  $w_{от}$  находится в зависимости от скорости  $v$  и относительной скорости отцепа  $w_{от}$  ( $w_{от} = v - v_{вет}$ ) и числитель (2.28) становится равным  $w_{от}^2$ .

Как показал анализ, дифференциальное уравнение (2.28), в котором независимой переменной является путь, является нелинейным уравнением второго порядка. Для его решения необходимо использовать метод Эйлера. В то же время использование данного уравнения для моделирования скатывания отцепа с учетом реально действующих тормозных сил требует использования численных методов. В частности, для реализации заданной скорости выхода отцепа из тормозной позиции необходимо уменьшить его скорость практически до нуля, после чего продолжить движение отцепа с заданной скоростью. Таким образом, для реализации заданной скорости выхода отцепа из тормозной позиции необходимо использовать численные методы. В частности, для реализации заданной скорости выхода отцепа из тормозной позиции необходимо использовать численные методы. В частности, для реализации заданной скорости выхода отцепа из тормозной позиции необходимо использовать численные методы.

#### 2.3.2. Моделирование движения отцепа с низкими скоростями

Спротивление отцепа на горках. Для расчета  $C_{ск}$  в модели горки содержится информация о размещении и параметрах стрелок и кривых на путях скатывания. Спротивление от воздушной среды и ветра  $w_{св}$  также является непрерывной функцией скорости отцепа  $v$  и определяется в соответствии с [4]:

$$w_{св}(v) = k_{св} v_{от}^2,$$

где относительная скорость отцепа и ветра равна

$$v_{от}^2 = (v^2 + v_{вет}^2 \pm 2vv_{вет} \cos \beta) \text{sign}(v \pm v_{вет} \cos \beta).$$

Коэффициент сопротивления от воздушной среды и ветра для отцепа из  $n$  вагонов определяется как

$$k_{св} = \frac{17.8}{Q(273 + t^o)} (C_x F_1 + \sum_{j=2}^{m_{от}} C_{xx} F_j).$$

Коэффициенты  $C_x$  и  $C_{xx}$  зависят от угла между результирующим вектором относительной скорости  $v_{от}$  и направлением скатывания отцепа [75]:

$$C = C_0 e^{\alpha(C_1 - \alpha C_2)}.$$

Здесь  $C_0, C_1, C_2$  - постоянные коэффициенты, зависящие от типа вагона и от места его расположения в отцепах.

Угол  $\alpha$ , в свою очередь, зависит от скорости движения вагона  $v$ :

$$\alpha = \arcsin \left| \frac{v_{вет} \sin \beta}{v_{от}} \right|.$$

Для расчета сопротивления  $w_{св}$  в модели отцепа содержатся данные о весе и типе каждого вагона, а в таблицах нормативно-справочной информации хранятся данные для определения значений коэффициентов воздушного сопротивления  $C_x, C_{xx}$  на каждом шаге  $\Delta s$ .

После нахождения значений скорости  $v_1, v_2, \dots, v_n$  на отрезке  $[s_0, s_0 + s]$  можно найти значения времени движения  $T_1, T_2, \dots, T_n$  по средней скорости отцепа на каждом шаге  $\Delta s$ .

Были исследованы абсолютные и относительные погрешности рас-  
 из которых варьировались на двух уровнях.

Исследования были выполнены с использованием методов плани-  
 рования экспериментов; при этом учитывалось влияние 10 факторов, каж-  
 дый из которых варьировался на двух уровнях.

Исследования были выполнены с использованием методов плани-  
 рования экспериментов; при этом учитывалось влияние 10 факторов, каж-  
 дый из которых варьировался на двух уровнях.

В заключение была выполнена оценка разрабатываемых алгоритмов по  
 точности и быстродействию. Учитывая, что точность решения зависит от па-  
 раметров горки и отцепов, а также от условий их скатывания, были исследо-  
 ваны погрешности моделей в различных точках пространства влияния па-  
 раметров. Исследования были выполнены с использованием методов плани-  
 рования экспериментов; при этом учитывалось влияние 10 факторов, каж-  
 дый из которых варьировался на двух уровнях.

$$\begin{aligned} k_4 &= \Delta v \cdot f(s_j, v_j) + \Delta v^2 / 2 + \Delta k_4 / 2, \\ k_3 &= \Delta v \cdot f(s_j, v_j) + \Delta v^2 / 2 + \Delta k_3 / 2, \\ k_2 &= \Delta v \cdot f(s_j, v_j) + \Delta v^2 / 2 + \Delta k_2 / 2, \\ k_1 &= \Delta v \cdot f(s_j, v_j), \\ v_{j+1} &= v_j + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 + O(\Delta s^5), \\ s_{j+1} &= s_j + \Delta v \cdot f(s_j, v_j) + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 + O(\Delta s^5). \end{aligned}$$

Как видно из (2.31), функция  $s'' = f(t, s, s')$  не зависит явно от  $t$  и поэтому  
 можно использовать сокращенную запись  $s'' = f(s, s')$  или равносильную ей  
 для решения уравнения (2.31) рекомендуется использовать метод Рунге-  
 Кутты IV порядка, который обеспечивает четвертый порядок точности  
 $O(\Delta s^5)$ ; ниже приведены соответствующие формулы:

Для решения уравнения (2.28) целесообразно использовать метод Рун-  
 ге-Кутты IV порядка, при котором для нахождения значений скорости ис-  
 пользуются расчетные формулы:

$$\begin{aligned} v_{j+1} &= v_j + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 + O(\Delta s^5), \\ k_1 &= \Delta s \cdot f(s_j, v_j), \\ k_2 &= \Delta s \cdot f(s_j + \Delta s / 2, v_j + k_1 / 2), \\ k_3 &= \Delta s \cdot f(s_j + \Delta s / 2, v_j + k_2 / 2), \\ k_4 &= \Delta s \cdot f(s_j + \Delta s, v_j + k_3), \end{aligned} \quad (2.30)$$

где  $v_j = f(s_j, v_j)$ .

Данный метод обеспечивает четвертый порядок точности  $O(\Delta s^5)$ .

Для моделирования процесса скатывания отцепов с горки при выборе в  
 качестве независимой переменной времени  $t$  целесообразно использовать  
 дифференциальное уравнение второго порядка  $s'' = f(t, s, s')$ . Для решения дан-  
 ного уравнения численными методами выберем на интервале времени  
 $[T_0, T_0 + t]$  некоторую систему значений аргумента  $\{T_j\}$ ,  $j = 0, n$  так, чтобы  
 выполнялись соотношения  $T_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_n = T_0 + t$ ; здесь  $\Delta t = T_{j+1} - T_j$  - шаг  
 интегрирования. Для решения задачи нужно найти приближенные значения  
 $(s_1, v_1), (s_2, v_2), \dots, (s_n, v_n)$  точных решений  $s(t)$  и  $v(t)$  следующего уравнения:

$$s'' = \frac{d^2 s}{dt^2} = g'(i - w_0 - w_{ск} - w_{св}) \cdot 10^{-3}, \quad (2.31)$$

при начальных условиях  $s(t_0) = s_0$  и  $s'(t_0) = v_0$  (задача Коши).

Значительное преимущество данной формы уравнения движения заклю-  
 чается в том, что в нем в явном виде присутствуют оба аргумента -  $s$  и  $v$ . Это  
 позволяет упростить определение уклона  $i$ , который является функцией  $s$ , и  
 сопротивления от стрелок и кривых  $w_{ск}$ , которое зависит и от  $s$ , и от  $v$ . Кроме  
 того, использование данного уравнения позволяет также на каждом шаге  $\Delta t$   
 находить не только скорость отцепа  $v$ , но и пройденное расстояние  $s$ . В ре-  
 зультате получают более точные значения  $s$ , чем определяемые по средней  
 скорости отцепа в интервале  $\Delta t$ .

Площадь отдельного прямоугольника диаграммы  $w_t = f(s)$  представляет  
 собой удельную работу тормозных сил  $\Delta h_t$  на перемещение  $\Delta s$ . Накопленная  
 величина удельной работы тормозных сил  $h_t$  при полном торможении вагона  
 одним замедлителем приведена в виде диаграммы  $h_t = f(s)$  на рис. 2.10.

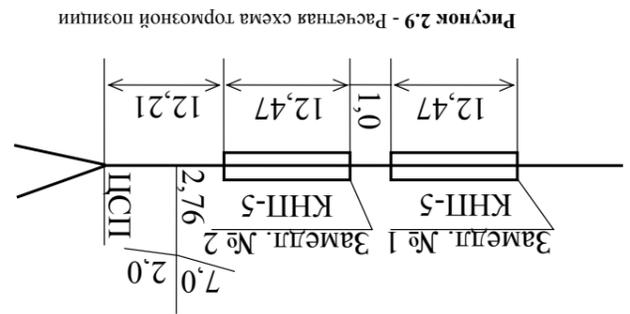


Рис. 2.9 - Расчетная схема тормозной позиции

Как показано результаты расчетов, величина удельной тормозной  
 силы  $w_t$  прямо пропорциональна количеству осей вагона  $n_{0,3}$ .  
 Изменение величины  $w_t$  в зависимости от положения первой оси вагона  $s$  от-  
 носительно начала замедлителя имеет дискретный характер и приведено в  
 виде диаграммы  $w_t = f(s)$  на рис. 2.10.

Целью анализа выполнения моделирования процесса торможения ва-  
 гона одним замедлителем (№1), показателями которого являются: скорость  
 $v_{нат} = 5$  м/с и направление  $\beta = 20^\circ$ .

- летние условия скатывания при температуре  $t^0 = 20^\circ \text{C}$ , попутный ветер  
 $w_{пв} = 0,5$  кгс/тс, (бегун ОХ);

- расчетный отцеп - одиночный 4-осный полувагон весом  $Q^0 = 85$  тс и ос-  
 $H^0 = 1,2$  м эн. в.;

медлителями КНШ-5 (рис. 2.9), номинальной мощностью каждого  
 - тормозная позиция на спускной части горки, оборудованная двумя за-  
 медлителями (№1, №2), показателями которого являются: скорость  
 $v_{нат} = 5$  м/с и направление  $\beta = 20^\circ$ .

Целью анализа выполнения моделирования процесса торможения ва-  
 гона одним замедлителем (№1), показателями которого являются: скорость  
 $v_{нат} = 5$  м/с и направление  $\beta = 20^\circ$ .

Изменение величины  $w_t$  в зависимости от положения первой оси вагона  $s$  от-  
 носительно начала замедлителя имеет дискретный характер и приведено в  
 виде диаграммы  $w_t = f(s)$  на рис. 2.10.

Площадь отдельного прямоугольника диаграммы  $w_t = f(s)$  представляет  
 собой удельную работу тормозных сил  $\Delta h_t$  на перемещение  $\Delta s$ . Накопленная  
 величина удельной работы тормозных сил  $h_t$  при полном торможении вагона  
 одним замедлителем приведена в виде диаграммы  $h_t = f(s)$  на рис. 2.10.

Таблица 2.6

Показатели процесса торможения вагона одним замедлителем

$s$ , м	$\Delta s$ , М	$w_{тс}$ , кгс/тс	$\Delta h_{тс}$ , м эн. в.	$h_{тс}$ , м эн. в.	$n_{0,3}$ осей	$\Delta D_{тс}$ , осе-м	$D_{тс}$ , осе-м
0	-	-	-	0	-	-	0
1,85	1,85	24,05	0,045	0,045	1	1,85	1,85
8,65	6,80	48,10	0,327	0,372	2	13,60	15,45
10,50	1,85	72,15	0,133	0,505	3	5,55	21,00
12,48	1,975	96,20	0,190	0,695	4	7,90	28,90
14,33	1,85	72,15	0,133	0,828	3	5,55	34,45
21,18	6,80	48,10	0,327	1,155	2	13,60	48,05
22,98	1,85	24,05	0,045	1,200	1	1,85	49,90

Учитывая, что балочные замедлители могут быть включены и выключе-  
 ны в любой момент, удельную работу тормозных сил в общем виде можно  
 представить (см. рис. 2.10) как функцию

$$h_t = f(s_{нт}, L_t), \quad (2.35)$$

где  $s_{нт}$  - координата положения первой оси вагона в момент начала  
 торможения;

$L_t$  - длина зоны торможения, м.

Как следует из рис. 2.10, функция (2.35) является кусочно-линейной,  
 что затрудняет ее аналитическое описание, поэтому определение ее отдель-  
 ных значений целесообразно выполнить путем моделирования процесса тор-  
 можения. Реализация некоторого режима торможения, заданного величиной  
 $h_t$  (при условии  $h_t > H_t$ ), возможна различными способами, отличающимися  
 значениями  $s_{нт}$  и  $L_t$ . Предельными случаями при этом являются (см. рис.  
 2.10): торможение вагона с момента входа его первой оси на замедлитель  
 (с головы), при этом  $s_{нт} = 0$ , и торможение до момента выхода последней оси  
 из замедлителя (с хвоста), когда  $s_{нт} = s_{хв} = s_{вх} - L_t$ . Множество возможных решений  
 находится в пределах

$$P^{cb} = L^m \sum_{x=1}^{l=1} \Delta p_l \quad \text{где } \Delta p_l \text{ при } d^l d^{l-1} d^{l-2} \dots d^1 < 0; \quad \left. \begin{array}{l} \text{или } d^l d^{l-1} d^{l-2} \dots d^1 \leq 0. \end{array} \right\}$$

лителя ( $d$ ):

Для расчета расхода энергии на торможение отцеп в процессе моделирования на каждом шаге фиксируется факт увеличения давления в тормозных цилиндрах каждого замедлителя ( $\Delta p^l > 0$ ). Полученные данные используются для расчета расхода свободного воздуха в зависимости от типа замедлителя и числа шагов моделирования.

на  $l$ -м шаге моделирования; где  $w^m$  – общее удельное сопротивление замедлителей позиции

$$(2.34) \quad h^d = \sum_{x=0}^{l=1} w^m \Delta s_l$$

скатывания отцеп, определяется с помощью выражения:

Энергетическая высота, погашаемая тормозной позицией в процессе моделирования.

В процессе моделирования по каждой из тормозных позиций фиксируются результирующие данные  $h^d, P^{cb}$  для определения показателя процесса торможения.

(п. 2.2) в зависимости от типа замедлителя  $d$ .

Расчет  $f(d, z^s, q^b)$  выполняется в соответствии с описанной ранее методикой  $w^m = f(d, z^s, q^b)$ , если  $s_{jt} \in [\max(s^{ms}, s^{nt}), \min(s^{ms}, s^{nt} + L^t)]$ , иначе  $w^m = 0$ .

деформация определяется из выражения:

Для включения замедлителей ( $\nu = 1$ ) величина  $w^m$  на каждом шаге моделирования определяется по маршруту скатывания отцеп;

включен, 0 – выключен);

$\nu$  – параметр, характеризующий текущее состояние замедлителя (1 – включен, 0 – выключен);

$n$  – идентификатор типа замедлителя;

$s^{ms}, s^{nt}$  – соответственно начало и конец замедлителя, м;

где  $d$  – идентификатор тормозной позиции, к которой относится замедлитель;

При реализации заданной погашаемой энергетической высоты выполняется построение зависимости потери энергетической высоты от длины зоны торможения  $h_p = f(L_t)$ . Указанная функция является кусочно-линейной. Величина приращения потери энергетической высоты на шаге определяется в соответствии с выражением (2.34).

Подбор скорости отцеп в заданной точке выполняется итеративно. На первом этапе осуществляется скатывание отцеп без торможения  $L_t = 0$ . Для корректирования режима торможения после очередной итерации вычисляется величина избыточной энергетической высоты  $\Delta h$ , которую необходимо дополнительно погасить на тормозных позициях горки на следующей итерации:

$$\Delta h = \frac{v_\phi^2 - v_s^2}{2g'}$$

где  $v_\phi, v_s$  – соответственно, фактическая и заданная скорость в указанной точке, м/с.

Длина зоны торможения определяется в соответствии с зависимостью  $L_t = f(h_p)$ . Графическая интерпретация выбора режима торможения представлена на рис. 2.8.

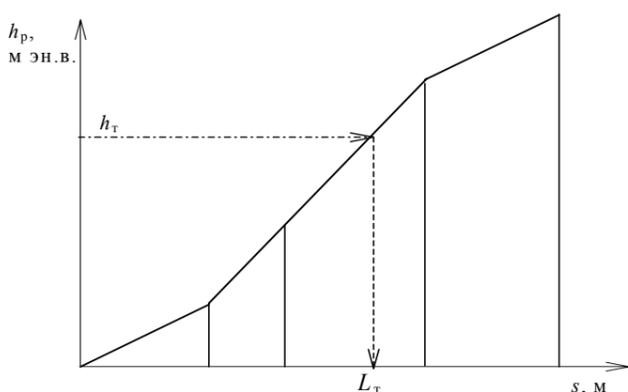


Рисунок - 2.8. Зависимость погашаемой энергетической высоты от длины зоны торможения

$$d^j = (d, s^{ms}, s^{nt}, n, \nu, f) \quad (K^j)$$

модель в модели скатывания представляется структурой

удельных тормозных сопротивлений в процессе моделирования. Каждый за-

Модели тормозных замедлителей используются для определения

$K^m$  – число тормозных позиций по маршруту скатывания.

расход свободного воздуха при реализации заданных значений  $s^{ms}, L^t$  и  $z^s$ ;

$h^d, P^{cb}$  – соответственно, погашаемая энергетическая высота, м э. в. и

$z^s$  – заданная скорость торможения;

можеция, м;

где  $s^{ms}, L^t$  – соответственно, заданная координата начала и длина зоны тор-

$$d^j = (s^{ms}, L^t, z^s, h^d, P^{cb}), \quad (j=1, \dots, K^m)$$

виде структуры данных:

татов моделирования торможения. Каждая тормозная позиция представляется в

расчет параметров торможения для отдельных отцепов и накопление резуль-

тате управляющих воздействий от человека, выполняющего моделирование;

Модели тормозных позиций выполняются следующие функции: воспри-

модели тормозных позиций и модели отдельных замедлителей.

Для реализации указанных функций в модели скатывания включены

жимных, весовых, и рычажно-нажимных замедлителей (РНЗ).

где  $w^m, w^{tr}, w^{tr}$  – удельные тормозные сопротивления соответственно на

$$w^m = w^{tr} + w^{tr}$$

разного типа, которые могут одновременно действовать на отцеп;

ление  $w^m$  рассматривается как сумма удельных тормозных сил замедлителей

цепом тормозных позиций. В данной модели удельное тормозное сопротив-

лопоглощения торможения, которое появляется при прохождении от-

Процесс торможения в модели скатывания отцеп имитируется в виде

### 2.3.3. Моделирование работы тормозных позиций

вин шата вин уравнения движения

расчетов их скорости при произвольных режимах торможения без уменьше-

(2.28), вычисленное значение  $v'_{j+1}$  может оказаться во много раз больше действительной величины; это вызвано значительной нелинейностью кривой  $v(s)$  в области низких скоростей. Данное обстоятельство приводит к тому, что значение  $v_{j+1}$ , определенное на данном шаге с помощью выражений (2.30), может оказаться намного больше реального.

Для примера на рис. 2.6 показаны графики скорости  $v(s)$  скатывания отцеп ОХ в неблагоприятных зимних условиях при его торможении на СТП, полученные в результате моделирования с шагом  $\Delta s \leq 1$  м. Скорость входа на СТП составляет  $v'' = 3.90$  м/с, а заданная скорость выхода из СТП –  $v' = 1.48$  м/с. Торможение скатывающегося отцеп начинается с момента входа его первой оси на первый замедлитель СТП ( $s_{tr} = 0$ ); длина зоны торможения  $L_t = 14,686$  м. При этом вариант, при котором для моделирования используются выражения (2.28), (2.30), показан на данном рисунке пунктирной линией (вариант 2). В этом случае в конце последнего шага ( $s_j = 164,506$  м), на котором на отцеп еще действует тормозная сила ( $w_t = 72,14$  н/Кн) и поэтому величина  $v'_j$  (2.28) отрицательна ( $v'_j < 0$ ), его скорость равна  $v_j = 0,006$  м/с. На следующем шаге  $\Delta s_{j+1} = 0,494$  м (без торможения,  $w_t = 0$ ,  $v'_{j+1} > 0$ ) скорость отцеп начинает возрастать; при этом из-за значительной кривизны графика скорости  $v(s)$  на этом шаге значения  $v'_{j+1}$  для (2.30) вычисляются с помощью (2.28) с большой погрешностью. Вследствие этого рассчитанное приращение скорости на данном шаге составило  $\Delta v_{j+1} = 1,741$  м/с, что привело к ее скачкообразному увеличению в точке  $s_{j+1} = 165,0$  м до величины  $v_{j+1} = 1,747$  м/с (см. рис. 2.6, вариант 2).

Для устранения указанного недостатка можно использовать переменный шаг интегрирования, величина которого выбирается в зависимости от характера изменения кривой скорости отцеп на соответствующем участке. В частности, для контроля правильности выбора шага  $\Delta s$  при использовании метода Рунге-Кутты IV порядка рекомендуется вычислять дробь [76]:

рования скатывания отцепов позволяет обеспечить необходимую точность. Таким образом, предположенное совершенствование методики моделирования участка с уменьшенным шагом  $\Delta s$  в данном случае с уменьшенным шагом  $\Delta s$  подтверждается проверочным моделированием движением отцепов на отцепе. Действительному значению скорости отцепов в данной точке, что равно  $v_{f+1} = 165,0$  м/с, она будет равна  $v_{f+1} = 0,243$  м/с. Данная величина скорости отцепов возрастает всего на  $0,236$  м/с, так что в конце данной линии (вариант 1). В данном случае на первом шаге после окончания торможения скорость отцепов возрастает всего на  $0,236$  м/с, так что в конце данной линии (вариант 1). В данном случае на первом шаге после окончания торможения скорость отцепов возрастает всего на  $0,236$  м/с, так что в конце данной линии (вариант 1). В данном случае на первом шаге после окончания торможения скорость отцепов возрастает всего на  $0,236$  м/с, так что в конце данной линии (вариант 1).

Предложенное совершенствование методики моделирования было использовано при построении графика  $v(s)$ , показанного на рис. 2.6 сплошной линией (вариант 1). В данном случае на первом шаге после окончания торможения скорость отцепов возрастает всего на  $0,236$  м/с, так что в конце данной линии (вариант 1). В данном случае на первом шаге после окончания торможения скорость отцепов возрастает всего на  $0,236$  м/с, так что в конце данной линии (вариант 1).

В данном выражении используется параметр  $k_1$ , который входит в формулу (2.30) и обычно уже определен по данным об отцепе в начале шага при первом шаге. Очевидно, что расчет  $v_{f+1}$  с помощью данного выражения возможен только при условии  $Z \geq 0$ ; в противном случае расчет скорости на этом шаге. Очевидно, что расчет  $v_{f+1}$  с помощью данного выражения возможен только при условии  $Z \geq 0$ ; в противном случае расчет скорости на этом шаге.

При этом обычно делаются допущения о том, что уклон  $i$ , сопротивление движению от стрелок и кривых  $w^{кр}$ , а также от среды и ветра  $w^{св}$ , являются постоянными и на шаге  $\Delta s$  и определяются по данным об отцепе в начале шага. Практически для моделирования используется другое выражение, которое получают из (2.33):

$$v_{f+1} = \sqrt{v_f^2 + 2g'(\Delta s - w_0 - w^{кр} - w^{св}) \cdot 10^{-3}} \quad (2.33)$$

При этом обычно делаются допущения о том, что уклон  $i$ , сопротивление движению от стрелок и кривых  $w^{кр}$ , а также от среды и ветра  $w^{св}$ , являются постоянными и на шаге  $\Delta s$  и определяются по данным об отцепе в начале шага.

$$A = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - k_2} \quad (2.32)$$

При этом, если  $A$  больше нескольких сотых, следует уменьшить шаг  $\Delta s$ .

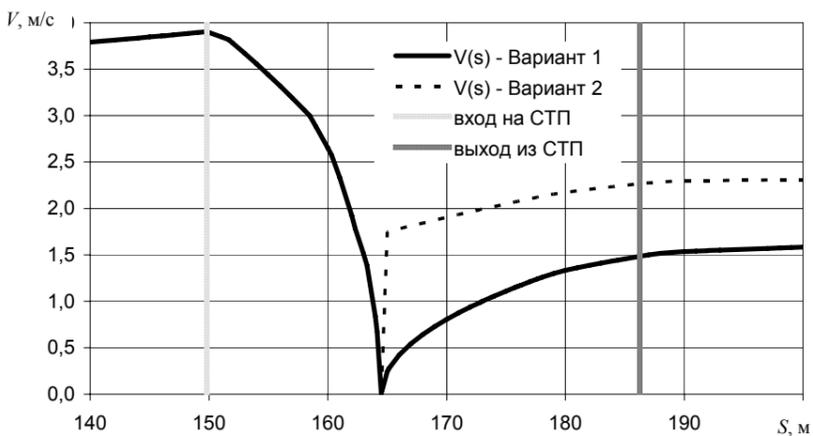


Рисунок 2.6 - Графики скорости скатывания отцепов ОХ с остановкой на СТП

Как показали расчеты, в рассмотренном выше примере величина  $A$  (2.32) на последнем шаге  $\Delta s_{f+1}$  составила  $A = -0,51$ , что значительно превышает допустимую величину. Таким образом, данный шаг  $\Delta s_{f+1} = 0,494$  м следовало разбить на несколько еще более мелких шагов.

Следует заметить, однако, что моделирование скатывания отцепов с переменным шагом приведет к существенному увеличению его продолжительности, что весьма нежелательно, особенно при решении задач оперативного управления процессом роспуска составов на горках. В этой связи в данной работе был предложен другой метод, который позволил ликвидировать обнаруженные недостатки, не изменяя выбранный шаг моделирования.

В частности предложено на каждом шаге вычислять значение  $A$  (2.32) и если оно достаточно велико ( $|A| > 0,1$ ), то для расчета скорости отцепов в конце данного шага использовать рекуррентное выражение, которое получают в

Показатель	Интенсивное торможение	Торможение первой ступени
Длина зоны торможения, м	22,283	45,86
Расход воздуха, м <sup>3</sup>	2,782	0,813
Расход электроэнергии, кВт·ч	0,248	0,072

Показатели торможения многоэтажного отцепов при  $h_f = 0,6$  м эн.в.

Таблица 2.5

В табл. 2.5 приведены показатели торможения данного отцепов при различных погашаемой энергетической высоты  $h_f = 0,6$  м эн.в.

Позиция, состоящей из двух замедлителей КНП-5. Для трехэтажного отцепов состоящего из вагонов ОХ, ОП и ОХ на тормозной висимости погашаемой энергетической высоты от длины зоны торможения ветствует наибольшее значение  $L_T$ . Для примера на рис. 2.7 представлено соотношение длины торможения на всей длине зоны торможения. Такому торможению соот- ходами воздуха. Наименее интенсивным торможением является торможение рас- каждое повышение ступени торможения сопряжено с дополнительными рас- ческая высота реализуется на минимальной длине  $L_T$ , а недостатком то, что данного варианта торможения является то, что при нем требуется энергетическая средняя скорости на замедлителе на  $i$ -м шаге. Преимуществом торможения определяется по условиям выжимания оси с минимальной на- гонных отцепов. При наиболее интенсивном торможении текущая ступень возможна различные варианты регулирования ступени торможения многоэта- жного отцепов. При этом задана возможность, либо рассчитана ЭВМ. При этом для нажимных и рычажно-нажимных замедлителей ступень торможения  $z$  может быть задана погашаемой энергией, либо рассчитана ЭВМ. При этом для соответствующего типа компрессора (см. табл. 2.4).

где  $\epsilon_{св}$  – удельный расход электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> свободного воздуха,

$$E_{отп} = \epsilon_{св} \sum_{k=1}^K P_{св}^k$$

мощности от типа компрессора с помощью выражения:

Расход электроэнергии на торможение отцепов определяется в зависи-

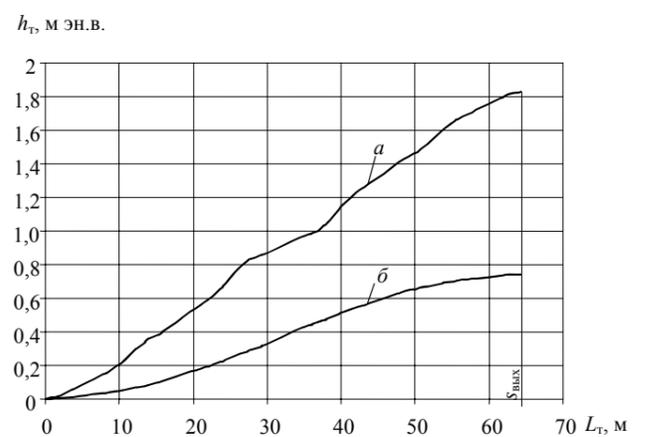


Рисунок 2.7 - Зависимость погашаемой энергетической высоты от длины зоны торможения: а – интенсивное торможение; б – торможение первой ступени.

#### 2.3.4. Моделирование регулируемого скатывания отцепов

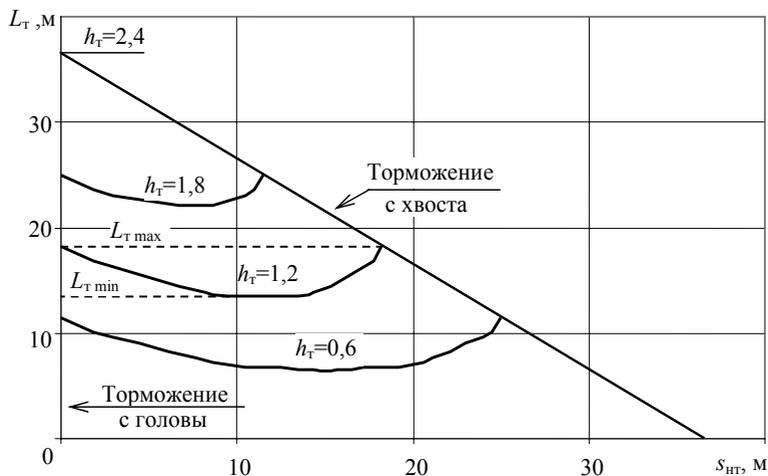
При выполнении скатываний отцепов в качестве управляющих воздействий в модель передается координата начала торможения  $s_{нт}$ , длина зоны торможения  $L_T$  и ступень торможения  $z_3$ . Для сокращения затрат ручного труда на подбор решений в модели реализованы следующие режимы:

- полная мощность тормозной позиции;
- погашаемая энергетическая высота;
- скорость выхода из тормозной позиции;
- скорость входа на следующую тормозную позицию;
- скорость в точке прицеливания.
- заданный интервал в первой паре отцепов;
- заданный интервал во второй паре отцепов;
- равные интервалы в первой и второй парах отцепов.

При реализации полной мощности тормозной позиции в качестве управляющих воздействий передаются  $s_{нт} = 0$ ,  $L_T = L_{нт} + l_{отп}$ , здесь  $l_{нт}$  – длина тормозной позиции;  $l_{отп}$  – длина отцепов.

четного бегуна при следующих условиях:

- скорость входа на тормозную позицию  $v=7$  м/с;
- заданная скорость выхода  $u_3=5,4$  м/с;
- торможение двумя замедлителями,  $K_{из}=2$ .



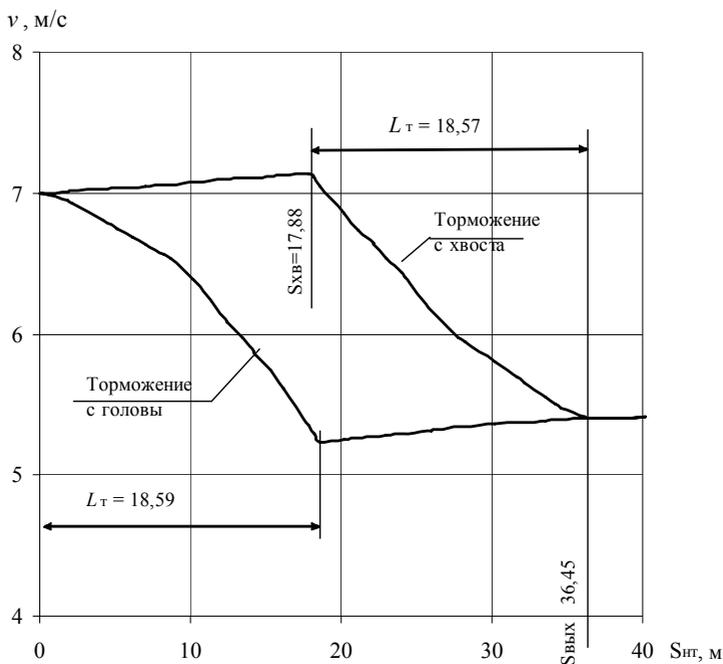
**Рисунок . 2.14** - Графическое представление функции  $L_T=f(h_T \cdot s_{HT})$  при торможении двумя замедлителями

Динамика изменения скорости скатывания бегуна при торможении с головы и хвоста представлена на рис. 2.15, а числовые характеристики – в табл. 2.10.

*Таблица 2.10*

Показатели регулирования скорости на предельных режимах торможения.

$v$ , м/с	$u_3$ , м/с	$s_{HT}$ , м	$h_T$ , м эн.в	$L_T$ , м	$D_{ТП}$ , осе-м	$t_{вых}$ , с
7,0	5,4	0	1,235	18,59	51,37	35,86
		17,88	1,233	18,57	51,29	35,13

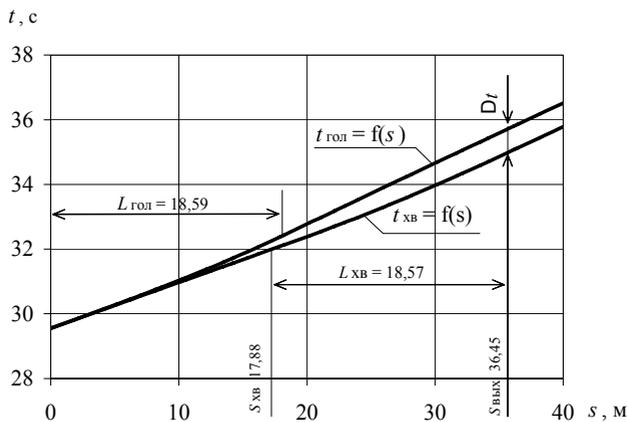


**Рисунок 2.15** - Динамика скатывания вагона на предельных режимах торможения

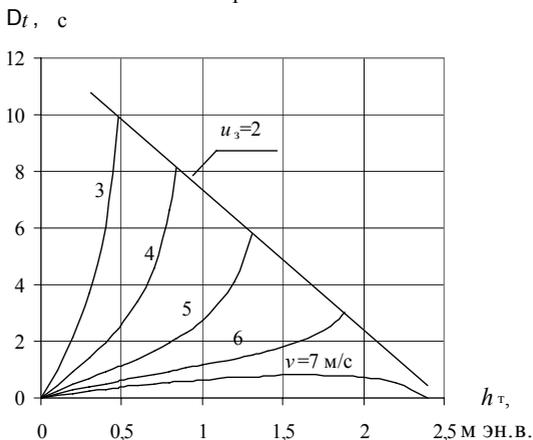
Различный характер изменения скорости скатывания вагона влечет за собой изменение продолжительности его скатывания. Динамика продолжительности скатывания вагона в рассматриваемых случаях приведена на рис. 2.16. Влияние режима торможения на продолжительность скатывания можно оценить величиной разницы продолжительности скатывания вагона до выхода из тормозной позиции:  $\Delta t = t_{гол} - t_{хв}$ , которая в данном случае составляет

$$\Delta t = 35,86 - 35,13 = 0,73 \text{ с.}$$

Очевидно, что величина  $\Delta t$  зависит от скорости входа на тормозную позицию  $v$  и работы сил торможения  $h_{\tau}$ , т.е.  $\Delta t = f(v, h_{\tau})$ . Варьируя значениями аргументов  $v$  и  $h_{\tau}$ , путем моделирования процесса торможения получены значения  $\Delta t$ , которые приведены в виде графических зависимостей на рис. 2.17.



**Рисунок 2.16** - Продолжительность скатывания на предельных режимах торможения

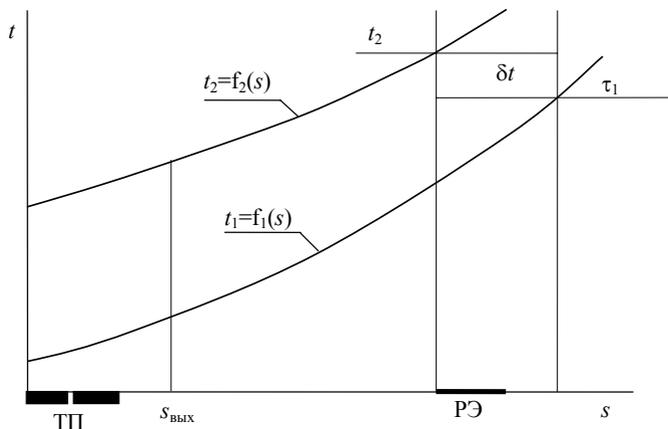


**Рисунок 2.17** - Графическое представление функции  $\Delta t = f(v, h_{\tau})$

Полученные результаты показывают, что режим торможения «голова-хвост» вызывает существенные (до 10 с) колебания продолжительности скатывания вагона по тормозной позиции, что непосредственно связано с условиями разделения отцепов на разделительных элементах.

При интервальном регулировании решается задача создания необходимого интервала между отцепами на разделительном элементе. Рассмотрим в качестве примера некоторую ситуацию на разделительном элементе (рис. 2.18), находящемся за тормозной позицией, с известным моментом освобождения

дения этого элемента скатывающимся впереди отцепом  $\tau_1=52,0$  с. Задача регулирования движения отцепа №2 (рис. 2.18) заключается в обеспечении продолжительности его скатывания до разделительного элемента, соответствующей условию:  $t_2 \geq \tau_1$ . Обозначив интервал между отцепами на разделительном элементе как  $\delta t = t_2 - \tau_1$ , условие разделения можно записать в виде:  $\delta t \geq 0$ .



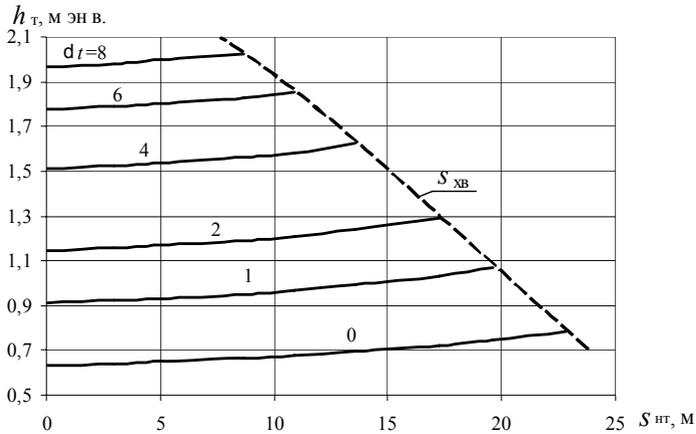
**Рисунок 2.18** - Расчетная схема образования интервала на разделительном элементе

С целью анализа влияния режимов торможения на условия разделения, с помощью модели выполнены эксперименты по установлению зависимости  $\delta t = f(s_{\text{нт}}, h_{\text{т}})$ . Результаты расчетов для принятых в примере исходных данных приведены в табл. 2.11 и в графическом виде — на рис. 2.19.

Полученные результаты показывают, что режим торможения ( $s_{\text{нт}}$ ) оказывает существенное влияние на условия разделения. В частности, для образования интервала  $\delta t = 2,0$  с допустимая зона координат начала торможения находится в пределах  $0 \leq s_{\text{нт}} \leq 17,27$  м. При этом удельная работа сил торможения колеблется в пределах  $1,144 \leq h_{\text{т}} \leq 1,292$  м эн. в. Последняя при этом связана с количеством используемых замедлителей, следовательно, с расходом воздуха и длиной тормозного пути, которые являются элементами энергетических расходов по торможению отцепов.

Показатели торможения по обеспечению разделительного интервала

$S_{HT}, \text{ м}$	Значения $h_T$ , м эн. в., в зависимости от $\delta t$ , с					
	0	1	2	4	6	8
0	0,630	0,909	1,144	1,509	1,775	1,970
3	0,640	0,921	1,157	1,523	1,788	1,983
5	0,649	0,932	1,169	1,536	1,801	1,997
8,68	0,664	0,951	1,189	1,560	1,827	2,026
10,9	0,678	0,968	1,210	1,584	1,856	-
13,57	0,696	0,993	1,239	1,624	-	-
17,27	0,724	1,031	1,292	-	-	-
19,61	0,745	1,067	-	-	-	-
22,81	0,783	-	-	-	-	-

Рисунок 2.19 - График зависимости  $h_T=f(S_{HT}, \delta t)$ 

Таким образом, модель скатывания отцепов с регулируемой зоной торможения позволяет более полно учитывать влияющие факторы при решении задач интервального регулирования скорости отцепов и определении расходов на их торможение.

ГЛАВА 3  
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ  
СКАТЫВАЮЩИХСЯ ОТЦЕПОВ

**3.1. Ограничения режимов торможения скатывающихся отцепов**

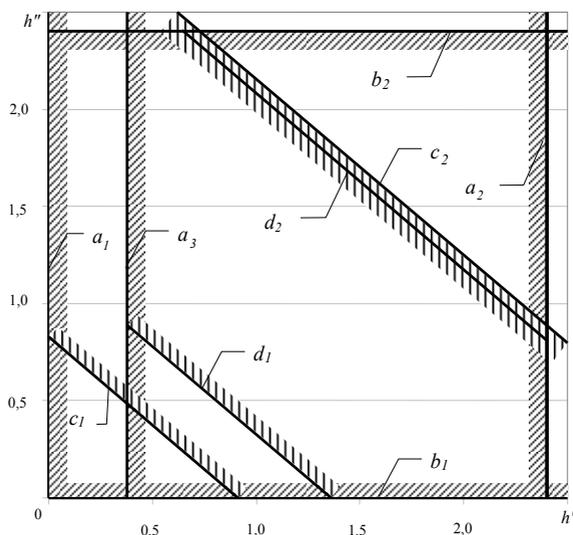
При решении задачи оптимизации режимов торможения отцепов необходимо, прежде всего, установить ограничения, которые накладываются на величину погашаемой энергетической высоты на каждой тормозной позиции. Как показали исследования [67], для каждого отцепа существует область допустимых режимов торможения (ОДР), конфигурация и площадь которой определяются его параметрами и условиями скатывания.

На трехпозиционных горках режим торможения скатывающегося отцепа можно представить вектором  $\mathbf{h}=(h', h'', h''')$  энергетических высот, погашаемых на верхней (ВТП), средней (СТП) и парковой (ПТП) тормозных позициях. При этом из трех указанных компонент вектора  $\mathbf{h}$  только две являются независимыми, так как третья может быть определена из условия обеспечения заданной скорости отцепа в точке прицеливания. В этой связи ОДР  $\Omega$  может быть представлена выпуклым многоугольником на плоскости  $h'0h''$ , а произвольный режим  $\mathbf{h} \in \Omega$  - вектором  $\mathbf{h}=\{h', h''\}$ .

Ограничения, образующие ОДР, определяются тремя группами факторов:

- тормозной мощностью замедлителей тормозных позиций;
- режимом скатывания отцепов на спускной части горки;
- требованиями прицельного регулирования скорости отцепов.

Для примера на рис. 3.1 показаны ограничения режимов торможения первых двух типов для очень хорошего бегуна (ОХ), который скатывается в неблагоприятных зимних условиях при встречном ветре на горке с тремя тормозными позициями (см. рис. 3.2). Верхняя (ВТП) и средняя (СТП) тормозные позиции оборудованы двумя парами замедлителей типа КНП-5; на парковых позициях (ПТП) установлено по три замедлителя РНЗ-2.



**Рисунок 3.1** - Ограничения режимов торможения ОХ на тормозных позициях спускной части горки

Ограничения по тормозной мощности замедлителей можно представить как

$$\begin{aligned} 0 &\leq h' \leq H', \\ 0 &\leq h'' \leq H'', \end{aligned}$$

где  $H'$ ,  $H''$  – суммарная номинальная тормозная мощность замедлителей, соответственно, ВТП и СТП.

Графически указанные ограничения представляются прямоугольником, который образуют оси координат  $h'$  и  $h''$ , а также линии, соответствующие значениям номинальной мощности замедлителей ВТП и СТП  $H'$  и  $H''$ ; в дальнейшем указанный прямоугольник будем называть областью возможных режимов торможения (ОВР). В рассматриваемом примере (см. рис. 3.1) ОВР образована линиями  $a_1$  ( $h'=0$ ),  $a_2$  ( $h'=H'$ ),  $b_1$  ( $h''=0$ ) и  $b_2$  ( $h''=H''$ ).



Вторая группа ограничений связана с режимом скатывания отцепа на спускной части горки. Всего таких ограничений четыре и определяются они минимальной и максимальной скоростями выхода отцепа из ВТП ( $u'_{\min}$ ,  $u'_{\max}$ ) и СТП ( $u''_{\min}$ ,  $u''_{\max}$ ). Указанные скорости определяют предельные значения энергетической высоты, которая может быть погашена на ВТП ( $h' \in [h'_{\min}, h'_{\max}]$ ) и СТП ( $h'' \in [h''_{\min}, h''_{\max}]$ ).

Максимальная скорость выхода отцепа из  $i$ -й ТП  $u^{(i)}_{\max}$  и, соответственно, минимальная погашаемая высота  $h^{(i)}_{\min}$  определяются из условия обеспечения допустимой скорости  $v^{(i+1)}_d$  входа этого отцепа на следующую  $(i+1)$ -ю ТП:

$$h^{(i)}_{\min} = \min \{ h^{(i)} | v^{(i+1)}(h^{(i)}) \leq v^{(i+1)}_d \}. \quad (3.1)$$

Минимальная скорость выхода из  $i$ -й ТП, очевидно,  $u^{(i)}_{\min} = 0$ , однако, для того, чтобы торможение не привело к остановке отцепа на позиции, принято  $u^{(i)}_{\min} = 0,05$  м/с; при этом максимальная погашаемая высота  $h^{(i)}_{\max}$  определяется как

$$h^{(i)}_{\max} = \max \{ h^{(i)} | u^{(i)}(h^{(i)}) > u^{(i)}_{\min} \}. \quad (3.2)$$

Указанные ограничения для ВТП ( $i=1$ ) представляют собой определенные числовые значения  $h'_{\min}$ ,  $h'_{\max}$ , которые графически изображаются вертикальными линиями. В приведенном на рис. 3.1 примере  $h'_{\min} = 0,378$  м эн. в. (линия  $a_3$ ), при которой скорость входа отцепа на СТП  $v'' = 7,0$  м/с. Энергетическая высота, при которой скорость выхода отцепа ОХ из ВТП минимальна, составляет  $h'_{\max} = 2,882$  м эн. в. (рис. 3.1, линия  $a_4$ ). Данное значение превышает номинальную мощность ВТП  $H' = 2,4$  м эн. в. и поэтому при существующих условиях минимальная скорость выхода отцепа из ВТП  $u'_{\min} = 0,05$  м/с не может быть реализована. Напротив, на других горках величина  $h'_{\max}$  может быть меньше номинальной мощности ВТП даже для отцепа ОХ при благоприятных условиях скатывания. В таких случаях тормозная мощность  $H'$  не может

быть реализована из-за остановки отцепа на ВТП и, соответственно, на рис. 3.1 линия  $a_4$  будет расположена слева от  $a_3$ .

На СТП ( $i=2$ ) погашаемая высота  $h''$ , при которой реализуется заданная скорость выхода отцепа  $u''$ , зависит от его торможения на ВТП. Поэтому предельные значения погашаемой высоты здесь представляются функциями  $h''_{\min} = f_1(h')$ ,  $h''_{\max} = f_2(h')$ , которые, как показали исследования [67], линейны:

$$h''_{\min} = k_1 h' + b_1, \quad (3.3)$$

$$h''_{\max} = k_2 h' + b_2. \quad (3.4)$$

При этом угловые коэффициенты в (3.3) и (3.4) практически одинаковы ( $k_1 = k_2 = k$ ), так что соответствующие участки границы ОДР представляют собой параллельные линии. В примере, приведенном на рис. 3.1, показаны ограничения  $h''_{\min} = -0,908h' + 1,449$  (линия  $c_1$ ) и  $h''_{\max} = -0,905h' + 3,023$  (линия  $c_2$ ). Торможение на СТП величиной  $h''_{\min}$  обеспечивает для ОХ допустимую скорость входа 6 м/с на ПТП.

Следует подчеркнуть, что для всех режимов торможения, принадлежащих линии  $h''_{\min} = f_1(h')$ , обеспечивается одна и та же скорость выхода отцепа из СТП ( $u''_{\max} = 5,54$  м/с). При реализации любого режима торможения, находящегося на линии  $h''_{\max} = f_2(h')$ , отцеп выходит из СТП с установленной минимальной скоростью  $u''_{\min} = 0,05$  м/с.

Коэффициент  $k$  в (3.3), (3.4) является отрицательным, а по абсолютной величине несколько меньшим единицы ( $|k| < 1$ ); при этом его численное значение зависит от параметров отцепа и условий его скатывания (величина  $|k|$  минимальна для очень плохих бегунов (ОП), скатывающихся в неблагоприятных зимних условиях).

Численное значение коэффициента ( $|k| < 1$ ) свидетельствует о том, что для обеспечения некоторой скорости  $u''$  выхода отцепа из СТП при торможении его только на одной из позиций (ВТП или СТП) на ВТП потребуется погасить большую энергетическую высоту, чем на СТП. Это объясняется зави-

симостью сопротивления движению отцепа от его скорости, среднее значение которой при торможении на ВТП будет ниже. Данную закономерность необходимо учитывать при определении режимов торможения отцепов с целью сокращения энергетических расходов, связанных с регулированием их скорости.

Третья группа ограничений режимов торможения отцепов на ВТП и СТП определяется требованиями прицельного регулирования скорости. Для их выполнения необходимо, чтобы любой режим, принадлежащий ОДР ( $\mathbf{h} \in \Omega$ ), обеспечивал докатывание отцепа до точки прицеливания  $s_n$  с допустимой при соударении скоростью  $v_n$  ( $0 \leq v_n \leq v_{n,д}$ ); при этом торможение на ПТП должно осуществляться в пределах её номинальной мощности ( $0 \leq h'' \leq H'''$ ). Указанные ограничения определяются минимальной  $u''_{пр.мин}$  и максимальной  $u''_{пр.маx}$  скоростями выхода отцепа из СТП, при которых выполняются условия прицельного регулирования. При этом минимальная скорость  $u''_{пр.мин}$  должна обеспечить его докатывание до точки прицеливания со скоростью  $v_n = 0$  без торможения на ПТП ( $h''' = 0$ ). Максимальная скорость  $u''_{пр.маx}$  соответствует такому режиму скатывания, при котором полностью используется мощность ПТП ( $h''' = H'''$ ), а скорость отцепа в точке прицеливания равна допустимой ( $v_n = v_{n,д}$ ). Предельные режимы торможения, обеспечивающие, соответственно, максимальную  $u''_{пр.маx}$  и минимальную  $u''_{пр.мин}$  скорости выхода отцепа из СТП, представляются как

$$h''_{пр.мин} = \{h'' | h''' = H''', v_n = v_{н,д}\}, \quad (3.5)$$

$$h''_{пр.маx} = \{h'' | h''' = 0, v_n = 0\}. \quad (3.6)$$

Как было показано выше, на СТП погашаемая высота  $h''$ , при которой реализуется заданная скорость выхода отцепа  $u''$ , зависит от его торможения на ВТП. Поэтому предельные значения погашаемой высоты  $h''_{пр.мин}$  и  $h''_{пр.маx}$  представляются линейными зависимостями, аналогичными (3.3) и (3.4), с од-

ним и тем же значением коэффициента  $k$ . В рассмотренном на рис. 3.1 примере указанные зависимости, определяющие предельные значения  $h''_{\text{пр}}$  при  $s_{\text{п}}=720$  м показаны линиями  $d_1$  ( $h''_{\text{пр, min}}=f_1(h')$  при  $v_{\text{п}}=1,5$  м/с и  $h'''=1,2$  м эн. в.) и  $d_2$  ( $h''_{\text{пр, max}}=f_2(h')$  при  $v_{\text{п}}=0$  и  $h'''=0$ ).

### 3.2. Определение области допустимых режимов торможения

Таким образом, выполненный анализ показал, что каждая из переменных  $h'$ ,  $h''$  может иметь несколько ограничений разного характера. Эти ограничения представлены параллельными прямыми и поэтому только одно из них может быть активным. В задачах оптимизации ограничение считается активным, если прямая, представляющая данное ограничение, проходит через оптимальную точку [68]. Как видно из примера на рис. 3.1, ограничение  $h' \geq 0$  (линия  $a_1$ ) не может быть активным; действительно, существует другое ограничение  $h' \geq h'_{\text{min}}$  и при этом  $h'_{\text{min}} > 0$ , поэтому оптимальное значение  $h'$  не может быть равно нулю.

Ограничение  $h''_{\text{min}}$ , показанное на рис. 3.1 линией  $c_1$ , может быть активным, если ПТП оборудована замедлителем Т-50, для которого допустимая скорость входа составляет  $v''_{\text{д}}=6$  м/с. Для других замедлителей, например РНЗ-2, допустимая скорость входа  $v''_{\text{д}}=7$  м/с и поэтому данное ограничение уже не может быть активным, так как на данной горке скорость входа ОХ на ПТП даже при свободном скатывании ( $v'''=6,99$  м/с) не превышает допустимой величины. Если же дальность скатывания  $s_{\text{п}} \leq 720$  м, то ограничение  $h''_{\text{min}}$ , в свою очередь, также не может быть активным, так как ограничение по условиям прицельного регулирования  $h''_{\text{пр, min}}$  (см. рис. 3.1, линия  $d_1$ ) расположено выше, чем  $h''_{\text{min}}$  (линия  $c_1$ ).

Известно, что если можно обнаружить ограничения, которые не активны в точке оптимума, то их можно исключить из модели и за счет этого уменьшить размерность задачи оптимизации. В этой связи был разработан

алгоритм построения ОДР, позволяющий идентифицировать и исключить неактивные ограничения до начала решения задачи оптимизации с учетом конструкции горки, параметров отцепа и условий скатывания. При этом была усовершенствована методика построения ОДР, изложенная в [67], в результате чего число узловых точек, по которым определяется ОДР, было сокращено до четырех.

Очевидно, что в ОДР все точки должны удовлетворять одновременно всем действующим ограничениям. Следовательно, в рассматриваемом примере для ОХ, скатывающегося до точки  $s_n=720$  м, ОДР представляет собой шестиугольник с вершинами 1-2-4-6-5-3 (см. рис. 3.3); режимы торможения, соответствующие вершинам ОДР, приведены в табл. 3.1. Все стороны указанного шестиугольника представляют собой ограничения, которые могут быть активными, т.е. на них может быть расположен оптимальный режим торможения.

Из всех вершин ОДР необходимо выделить две критические точки: точку 1, определяющую режим быстрого скатывания (Б) и точку 6 – режим медленного скатывания (М), при которых время скатывания отцепа, соответственно, минимально и максимально. Отметим, что точка Б находится на линии  $h''_{\min}(h')$ , а точка М – на линии  $h''_{\max}(h')$  (см. рис. 3.3). Очевидно, что для построения ОДР достаточно идентифицировать еще две точки – точку 2 (БН), расположенную на нижнем конце линии  $h''_{\min}(h')$ , и точку 5 (МВ) на верхнем конце линии  $h''_{\max}(h')$ . Действительно, как видно из рис. 3.3, координаты остальных двух точек ОДР 3 и 4 можно установить, пользуясь равенствами: для точки 3 –  $h'_3 = h'_1$ ,  $h''_3 = h''_5$ , для точки 4 –  $h'_4 = h'_6$ ,  $h''_4 = h''_2$ .

Для иллюстрации взаимосвязи между отдельными участками границы ОДР и режимами торможения отцепа на рис. 3.4 показаны графики скорости его скатывания при предельных режимах торможения, соответствующих отдельным вершинам ОДР, которая приведена на рис. 3.3.

Таблица 3.1

Режимы торможения в узлах ОДР

Точки	$h'$	$h''$	$h'''$	$V_{тв}$ , м/с
1 (Б)	0,378	0,891	1,2	1,5
2 (БН)	1,359	0	1,2	1,5
3 (БВ)	0,378	2,4	0,226	0
			0,042	1,5
4 (МН)	2,4	0	0,658	0
			0,474	1,5
5 (МВ)	0,716	2,4	0	0
6 (М)	2,4	0,877	0	0

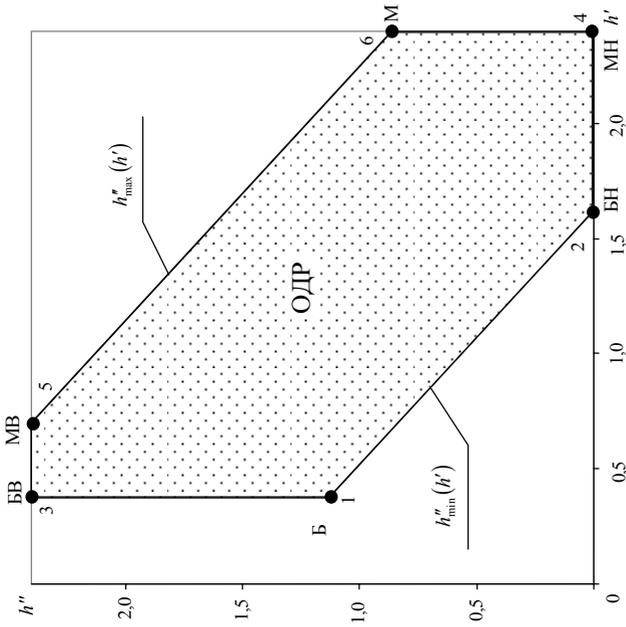
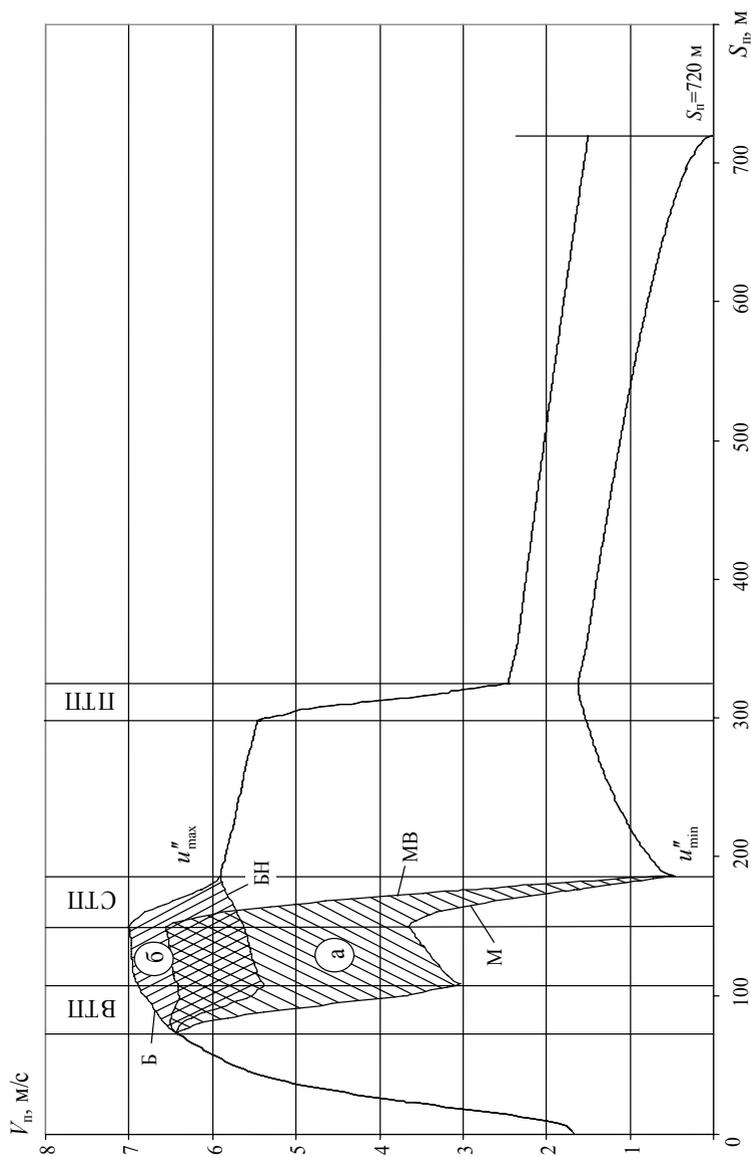


Рисунок 3.3. - Область допустимых режимов торможения ОХ при дальности скатывания  $S_{пг}=720$  м

На данном рисунке заштрихованы области возможных режимов движения ОХ на участке от входа на ВТП до выхода из СТП, которые соответствуют режимам торможения, находящимся на границе ОДР (область  $a$  – режимы линии  $h''_{\min}(h')$ , область  $b$  – режимы линии  $h''_{\max}(h')$ ). При этом граничные линии заштрихованных областей соответствуют узловым точкам ОДР: в области  $a$  максимальная скорость движения соответствует режиму Б (точка 1), минимальная скорость – режиму БН (точка 2). В области  $b$  максимальная скорость соответствует режиму МВ (точка 5), минимальная скорость – режиму М (точка 6). Как видно из приведенного рисунка, режим движения отцепа, определяемый скоростью выхода его из СТП, а, следовательно, и условия его разделения со смежными отцепами существенно зависят от степени участия ПТП в процессе регулирования скорости отцепа. С другой стороны, очевидно, что ПТП непосредственно определяет и условия прицельного регулирования скорости отцепа. В этой связи для обоснованного выбора оптимального распределения работы между ТП горки необходимо предварительно установить возможные режимы торможения отцепов на ПТП, соответствующие каждой точке ОДР.

С этой целью рассмотрим распределение погашаемой энергетической высоты между ВТП и СТП при двух характерных режимах работы ПТП: первый – полное использование номинальной мощности ПТП ( $h'''=H'''$ ) и торможение на СТП из условия остановки отцепа в точке прицеливания ( $v_n=0$ ) и второй – отсутствие торможения на ПТП ( $h'''=0$ ) и торможение на СТП из условия обеспечения максимально допустимой скорости отцепа в точке прицеливания  $v_n=1,5$  м/с.

Для иллюстрации взаимосвязи между отдельными участками границы ОДР и режимами торможения отцепа на рис. 3.4 показаны графики скорости его скатывания при предельных режимах торможения, соответствующих отдельным вершинам ОДР, которая приведена на рис. 3.3.

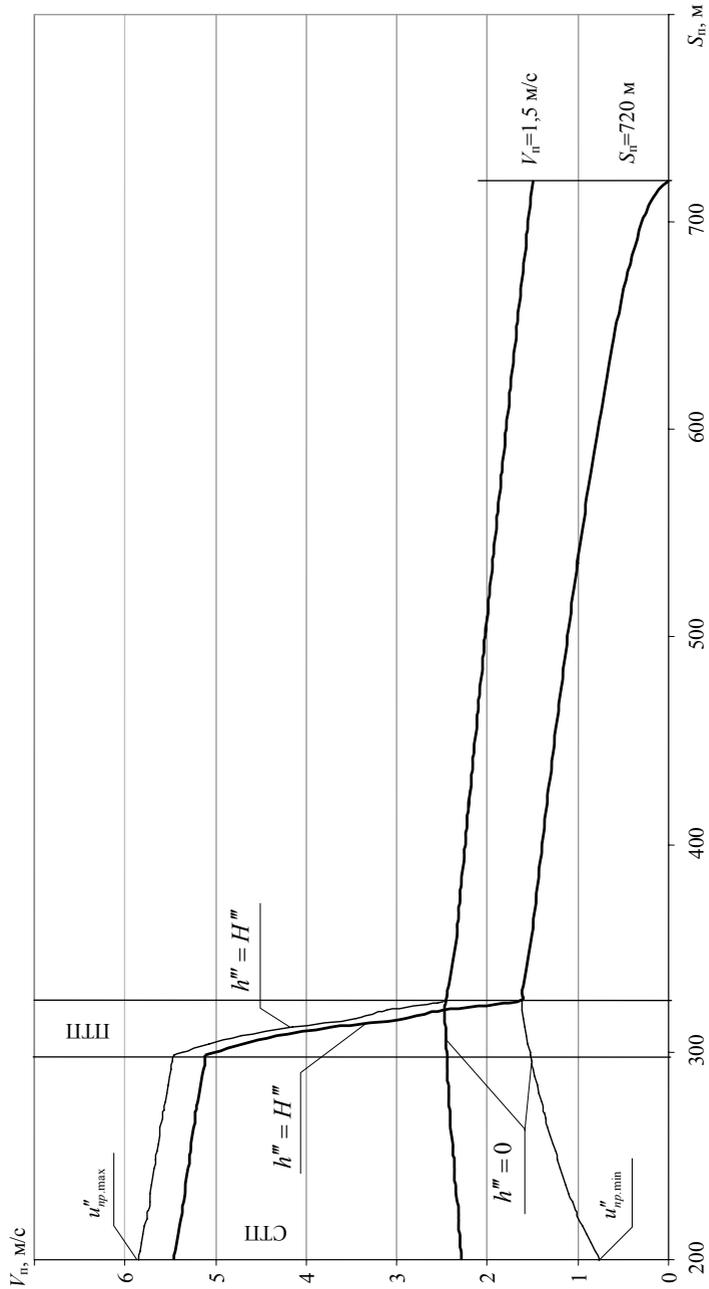


**Рисунок 3.4** - Эпюры скорости скальвания ОХ при режимах торможения, соответствующих узлам ОДР

Множество вариантов распределения погашаемой энергетической высоты между ВТП и СТП, которые позволяют реализовать два указанных режима движения, может быть представлено линиями  $h''=kh'+b$  (см. рис. 3.6). Указанные линии делят ОДР на три зоны – А, В и С. Для анализа изменения величины  $h'''$  в указанных зонах на рис. 3.7 показана область допустимых значений величины  $h'''$  для режимов  $\mathbf{h}$ , находящихся в ОДР на линии, для всех точек которой выполняется равенство  $h' = h''$ . Как видно из рисунка, в центральной части ОДР (зона А) каждому режиму  $\mathbf{h}$  соответствует определенный диапазон значений энергетической высоты, погашаемой на ПТП:  $h''' \in [h'''_{\min}, h'''_{\min} + \Delta h''']$ ; при этом ширина диапазона  $\Delta h'''$  постоянна во всей зоне А, а его границы соответствуют критическим значениям скорости в точке прицеливания ( $v_n(h'''_{\min}) = v_{n,d}$ ,  $v_n(h'''_{\min} + \Delta h''') = 0$ ). Значение  $h'''_{\min}$  линейно возрастает от 0 (точка 3) до максимума  $h'''_{\min} = H''' - \Delta h'''$  (точка 2).

В пограничных областях В и С (см. рис. 3.7) величина  $h'''$  линейно уменьшается от начального значения (точки 2 и 3) до нуля (точки 1 и 4), в результате чего в крайней точке 1  $h''' = H'''$  и  $v_n = 1,5$  м/с, а в другой крайней точке 4 –  $h''' = 0$  и  $v_n = 0$ .

Величина  $\Delta h'''$  представляет собой энергетическую высоту, которую необходимо дополнительно погасить на ПТП, чтобы уменьшить скорость оцепя в точке прицеливания от  $v_d$  до нуля; численное значение  $\Delta h'''$  зависит на конкретной горке от параметров отцепа и условий его скатывания.



**Рисунок 3.5** - Эпюры скорости скагивания ОХ при граничных режимах торможения

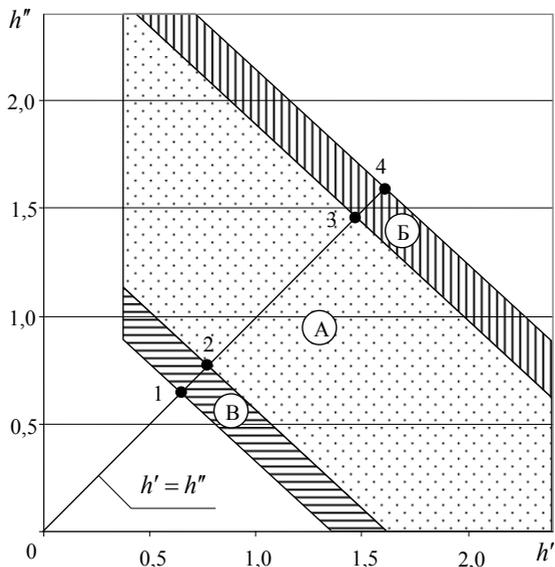


Рисунок 3.6 - Зоны ОДР с различным участием ПТП в процессе торможения отцепов

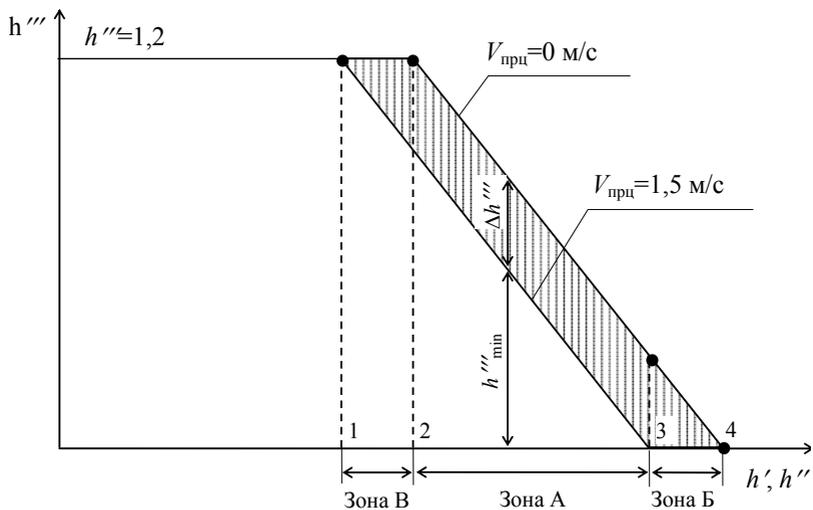


Рисунок 3.7 - Распределение энергетической высоты, погашаемой на ПТП

### 3.3. Исследование зависимости режимов торможения от параметров отцепов и условий их скатывания

В результате исследований режимов торможения отцепов, приведенных в [67], была установлена форма ОДР и показана ее связь с основным сопротивлением отцепа. Однако, для решения задачи оптимизации режимов торможения отцепов состава необходимо установить зависимости размеров ОДР и ее положения в системе координат  $h'0h''$  с параметрами отцепа и условиями его скатывания, в том числе требуемой дальностью пробега. С этой целью в данной работе были выполнены исследования влияния различных факторов на параметры ОДР. В качестве контролируемых факторов рассматривались вес  $Q_v$  и число вагонов  $n_{отц}$  в отцепах, сопротивление движению отцепов  $w_0$ , скорость  $v_{вет}$  и направление ветра  $\beta$ , температура воздуха  $t^\circ\text{C}$ , а также дальность скатывания отцепов, которая определяется координатой точки прицеливания  $s_{п.}$

При исследованиях рассматривались отцепы из 1 и 3 четырехосных полувагонов на роликовых подшипниках с разным весом  $Q_v$  и соответствующим основным сопротивлением  $w_0$ ; параметры вагонов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Параметры вагонов расчетных отцепов

Вес $Q_v$ , т	85	70	50	37
Основное удельное сопротивление $w_0$ , Н/кН	0,5	0,8	1,5	2,5

Данные об условиях скатывания отцепов приведены в табл. 3.3.

Исследования проводились на основе имитационного моделирования скатывания отцепов с заданными параметрами и условиями роспуска. Всего было выполнено 16 вычислительных экспериментов; параметры отцепов и условия роспуска в каждом эксперименте приведены в Приложении Б.

Таблица 3.3

## Условия скатывания расчетных отцепов

Характеристики	Условия	
	неблагоприятные	Благоприятные
Начальная скорость $0$ , м/с	1,7	1,7
Скорость ветра $v_{\text{ветр}}$ , м/с	5,0 (встречный)	-5,0 (попутный)
Направление ветра $\beta$ , град	20	20
Температура воздуха $t$ , °С	-10	0

В результате моделирования для каждого отцепа были определены режимы торможения, соответствующие четырем узловым точкам ОДР – Б, БН, М, МВ (см. п. 3.2). Указанные точки использовались для построения ОДР и расчета ее параметров.

В качестве основных параметров ОДР, характеризующих ее размеры и положение были приняты расстояния от линий  $h''_{\min}(h')$  и  $h''_{\max}(h')$  до начала координат (соответственно,  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$ ), а также ширина ОДР  $E$ , равная расстоянию между указанными линиями. Расстояния  $R$  можно определить с использованием методов аналитической геометрии, зная уравнения указанных линий (3.3), (3.4):

$$R = \frac{b}{\sqrt{1+k^2}} \quad (3.7)$$

Тогда ширина ОДР определяется как разность указанных расстояний  $E=R_{\max}-R_{\min}$ . Результаты расчета расстояний  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  и ширины ОДР  $E$  для всех рассмотренных отцепов и условий скатывания приведены в табл. 3.4. Для анализа характера изменений ширины ОДР следует заметить, что образующим ее линиям  $h''_{\min}(h')$  и  $h''_{\max}(h')$  соответствуют определенные скорости выхода отцепа из СТП (соответственно,  $u''_{\max}$  и  $u''_{\min}$ ) (см. п. 3.1). Установлено, что расстояние между указанными линиями  $E$  (ширина ОДР) пропорционально разности квадратов предельных скоростей выхода отцепа из СТП

$$E=k_E((u''_{\max})^2-(u''_{\min})^2), \quad (3.8)$$

где  $k_E$  – коэффициент пропорциональности.

Таблица 3.4

Расстояние  $R_{\min}$  и ширина  $E$  ОДР для рассмотренных отцепов и условий скатывания

$V_{\text{нр}}$ м/с	$S_{\text{нр}}$ м	Одиночный отцеп, $w_0$ , Н/кН												Длинный отцеп, $w_0$ , Н/кН											
		0,5		0,8		1,5		2,5		0,5		0,8		1,5		2,5									
		$R_{\min}$	$E$	$R_{\min}$	$E$	$R_{\min}$	$E$	$R_{\min}$	$E$	$R_{\min}$	$E$	$R_{\min}$	$E$	$R_{\min}$	$E$	$R_{\min}$	$E$								
5	400	1,073	1,196	0,907	1,299	0,518	1,373	0	1,398	1,169	1,132	1,037	1,206	0,731	1,296	0,306	1,322								
	700	0,925	1,344	0,599	1,352	0	1,189	0	0,072	1,099	1,202	0,842	1,286	0,227	1,303	0	0,669								
	1000	0,613	1,347	0	1,451	0	0,175	0	0	0,916	1,285	0,515	1,291	0	0,849	0	0								
-5	400	1,401	1,000	1,311	1,054	1,100	1,182	0,795	1,243	1,361	1,026	1,273	1,074	1,066	1,186	0,769	1,224								
	700	1,488	0,914	1,306	1,059	0,884	1,255	0,269	1,241	1,425	0,963	1,249	1,098	0,837	1,226	0,241	1,220								
	1000	1,464	0,937	1,183	1,183	0,534	1,244	0	0,858	1,399	0,989	1,129	1,217	0,501	1,222	0	0,827								

С другой стороны, величина указанной разности в соответствии с законом сохранения энергии может быть определена как

$$(u''_{\max})^2 - (u''_{\min})^2 = 2g'(H''' + \Delta h_w + h_n), \quad (3.9)$$

где  $\Delta h_w$  – изменение удельной работы всех сил сопротивления движению отцепов на участке от СТП до точки прицеливания при изменении скорости его движения;

$h_n$  – удельная энергия, соответствующая скорости отцепов  $v_n$  в точке прицеливания.

Тогда, исходя из (3.8) и (3.9), ширину ОДР можно записать с помощью выражения

$$E = 2k_E g'(H''' + \Delta h_w + h_n) \quad (3.10)$$

Для анализа величины и характера изменений ширины ОДР в табл. 3.5 приведены результаты расчета величины  $E$  для некоторых отцепов при различных условиях их скатывания и дальности пробега в сортировочный парк, полученные по результатам имитационного моделирования скатывания указанных отцепов. Как видно, из приведенной таблицы, изменение параметров отцепов ( $Q_b, w_0$ ) и условий скатывания ( $v_{\text{вет}}$ ) приводит к существенным изменениям предельных скоростей выхода из СТП  $u''_{\max}$  и, особенно,  $u''_{\min}$ . При этом указанные скорости возрастают с увеличением сопротивления движению отцепов и дальности их скатывания. В то же время ширина  $E$  также зависит от указанных параметров, однако, в значительно меньшей степени. Данный факт может быть подтвержден анализом выражения (3.10), в котором все величины, кроме  $\Delta h_w$ , являются практически постоянными. Таким образом, изменения величины  $E$  определяются только вариацией удельной работы сил сопротивления  $\Delta h_w = \Delta h(u''_{\max}) - \Delta h(u''_{\min})$ , которая, как известно, незначительна. В то же время сопротивление движению отцепов существенно влияет на положение ОДР в области возможных режимов торможения

$h' \in [0, H']$ ,  $h'' \in [0, H'']$ . Для характеристики положения ОДР целесообразно использовать расстояние  $R_{\min}$  от линии  $h''_{\min}$  до начала координат.

Таблица 3.5

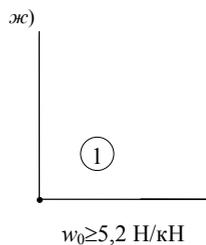
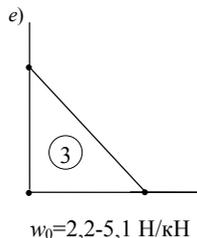
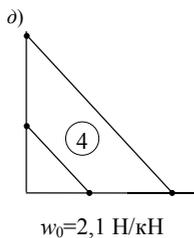
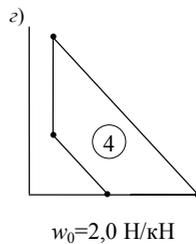
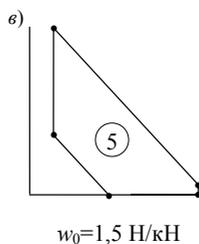
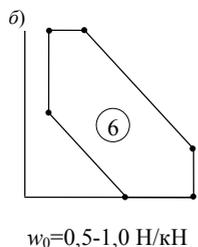
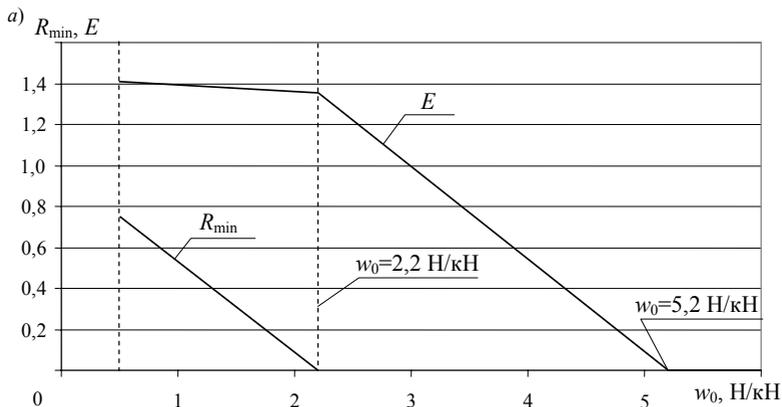
Расчет ширины ОДР

$Q_{в}$ , тс	$w_0$ , Н/кН	$s_{п}$ , м	Скорость ветра, $v_{вет}$ , м/с	$u_{\min}$ , м/с	$u_{\max}$ , м/с	$u_{\max}^2 - u_{\min}^2$ , (м/с) <sup>2</sup>	$k_E$	$E$ , м эн. в.
70	0,8	450	5,0	0,440	5,850	34,031	0,039	1,338
		600		1,960	6,171	34,243	0,039	1,345
		750		2,798	6,509	34,544	0,039	1,356
50	1,5	550	5,0	3,535	6,850	34,425	0,040	1,376
50	1,5	550	-5,0	0,904	5,750	32,248	0,039	1,253
		650		1,640	5,913	32,282	0,039	1,254
		750		2,148	6,079	32,338	0,039	1,256

### 3.4. Зависимость параметров ОДР от сопротивления движению отцеп

Очевидно, что с увеличением сопротивления движению отцеп должно уменьшаться его торможение на ВТП и СТП, что соответствует смещению ОДР к началу координат. При этом было установлено, что характер указанного изменения существенно зависит от скорости и направления ветра. Для иллюстрации данного явления на рис. 3.8, а показаны графики зависимости величин  $R_{\min}$  и  $E$  от сопротивления движению отцеп  $w_0$  при встречном ветре; указанные графики построены по данным табл. 3.6. В качестве отцеп рассматривался четырехосный полувагон весом 50 т, который скатывался с горки в неблагоприятных условиях при скорости встречного ветра 5,0 м/с до точки  $s_{п}=500$ м. Как видно из приведенных данных, при увеличении  $w_0$  от 0,5 до 2,2 Н/кН расстояние  $R_{\min}$  линейно уменьшается от 0,752 м эн. в. до 0; соответственно уменьшается при этом и торможение отцеп на ВТП и СТП  $h''_{\min}$  и  $h''_{\max}$ . Одновременно изменяется и форма ОДР – число ее вершин постепенно уменьшается от 6 до 3 (см. рис. 3.8, б-д). Следует заметить, что в дан-

ном диапазоне  $w_0$  ширина ОДР  $E$  уменьшается весьма незначительно (см. рис. 3.8, а).



**Рисунок 3.8** - Зависимости параметров ОДР от основного сопротивления движению отцепя (при встречном ветре): а – графики зависимостей  $R_{\min}(w_0)$  и  $E(w_0)$ ; б-ж – изменение формы ОДР с ростом  $w_0$

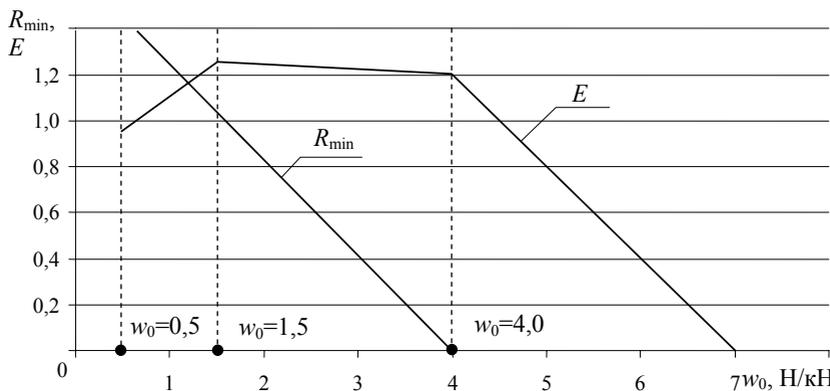
Параметры ОДР при скатывании отцепа в условиях встречного ветра

Параметры ОДР	Основное удельное сопротивление $w_0$ , Н/кН								
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,1	2,2	5,0	5,1	5,2
$R_{\min}$ , м эн. в.	0,752	0,525	0,300	0,076	0,031	0	0	0	0
$E$ , м эн. в.	1,409	1,387	1,374	1,365	1,363	1,348	0,079	0,035	0

При достижении сопротивлением  $w_0$  критического для данных горки, отцепа и условий скатывания значения 2,2 Н/кН величина  $h''_{\min}$  уменьшается до 0, а ОДР превращается в треугольник (см. рис. 3.8, *е*). При дальнейшем росте сопротивления ширина ОДР  $E$  резко уменьшается (см. рис. 3.8, *а*) и, наконец, достигает нуля и величина  $h''_{\max}$ . Для рассматриваемых условий это происходит при  $w_0=5,2$  Н/кН; при этом ОДР вырождается в точку в начале координат (см. рис. 3.8, *ж*). При таком режиме отцеп докатывается до точки прицеливания со скоростью  $v_n=0$  только при отсутствии торможения на всех ТП; если же сопротивление отцепа превысит величину  $w_0=5,2$  Н/кН, то он вообще не докатится до заданной точки прицеливания  $s_n=500$  м.

При достаточно сильном попутном ветре характер изменения ширины ОДР для хороших бегунов существенно изменяется. Для анализа указанных отличий были выполнены исследования зависимостей  $R_{\min}(w_0)$  и  $E(w_0)$  для того же отцепа при скорости попутного ветра  $v_{\text{вет}}=-5$  м/с (см. рис. 3.9); результаты моделирования скатывания отцепа при разных значениях  $w_0$  приведены в табл. 3.7. Как видно из приведенных данных, в отличие от условий встречного ветра, ОДР для очень хорошего бегуна ( $w_0=0,5$  Н/кН) при попутном ветре имеет достаточно малую ширину ( $E=0,953$  м эн. в.). С ростом  $w_0$  величина  $E$  не только не уменьшается, а достаточно интенсивно растет и достигает максимума при  $w_0=1,5$  Н/кН, после чего характер изменения ширины ОДР полностью соответствует условиям встречного ветра (ср. рис. 3.9 и 3.8). В

тоже время расстояние между ОДР и началом координат  $R_{\min}$  при попутном ветре уменьшается с ростом  $w_0$  точно так же, как и при встречном.



**Рисунок 3.9** - Зависимости параметров ОДР от основного сопротивления движению отцепа (при попутном ветре)

*Таблица 3.7*

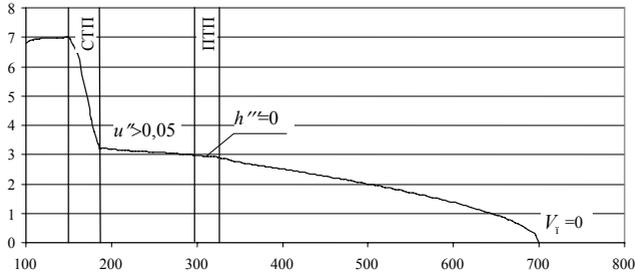
Параметры ОДР при скатывании отцепа в условиях попутного ветра

Параметры ОДР	Основное удельное сопротивление $w_0$ , Н/кН									
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	
$R_{\min}$ , м эн. в.	1,453	1,241	1,031	0,822	0,406	0	0	0	0	
$E$ , м эн. в.	0,953	1,102	1,249	1,233	1,218	1,205	0,792	0,382	0	

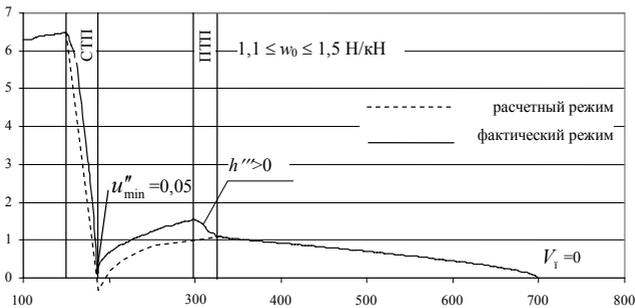
При этом значение  $R_{\min}$  при попутном ветре значительно выше, чем при встречном, что объясняется необходимостью увеличения степени торможения отцепов в первом случае. Причиной обнаруженного уменьшения ширины ОДР для хороших бегунов ( $w_0 \geq 1,1$  Н/кН) при попутном ветре является ограничение (3.2) по минимальной скорости выхода отцепа из СТП  $u''_{\min} = 0,05$  м/с. При этом избыточная энергетическая высота, которую невозможно в этих условиях погасить на СТП для обеспечения скорости отцепа  $v_n = 0$  в точке прицеливания, должна быть погашена на ПТП; схема подобного режима торможения показана на рис. 3.10, б.

Для отцепов, у которых  $w_0 < 1,1$  Н/кН, указанную энергетическую высоту невозможно погасить и на ПТП из-за остановки отцепа, поэтому у таких отцепов скорость в точке прицеливания будет выше заданной  $v_n = 0$  (см. рис. 3.10, в).

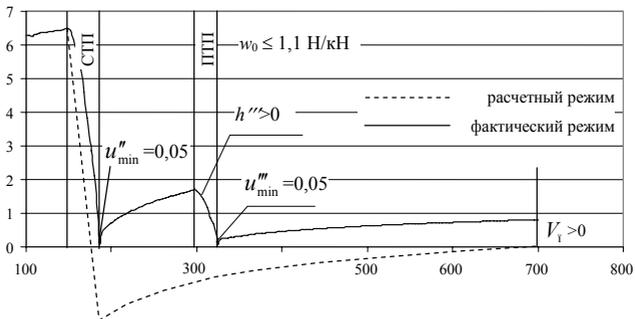
а)



б)



в)



**Рисунок 3.10** - Схемы режимов торможения отцепов на СТП и ПТП при попутном ветре и заданной нулевой скорости в точке прицеливания: а – без ограничения скорости выхода из СТП; б – при ограничении скорости выхода из СТП; в – при ограничении скорости выхода на СТП и ПТП

### 3.5. Влияние требуемой дальности скатывания отцепа на режим торможения

Следует заметить, что в ОДР положение всех участков границы, кроме линий  $h''_{\min}(h')$  и  $h''_{\max}(h')$ , является постоянным для данных горки, отцепа и условий скатывания. В то же время положение указанных линий зависит от требуемой дальности скатывания отцепа и может изменяться при изменении координаты точки прицеливания  $s_n$ . Как отмечалось выше, каждой из указанных линий соответствует определенное предельное значение скорости  $u''$  выхода отцепа из СТП, которая во многом определяет дальнейший режим движения отцепа и качество заполнения сортировочного пути вагонами. Таким образом, требования интервального и прицельного регулирования скорости отцепов оказываются взаимосвязанными, что необходимо учитывать при выборе оптимальных режимов торможения. В этой связи необходимо исследовать влияние потребной дальности скатывания отцепа на режимы его торможения на ВТП и СТП.

Для анализа изменений режимов торможения отцепов на ВТП и СТП в зависимости от потребной дальности их скатывания была проведена серия имитационных экспериментов с расчетными отцепами (см. табл. 3.2) при различных условиях скатывания (см. табл. 3.3). Для каждого эксперимента координата точки прицеливания  $s_n$  варьировалась в пределах от 400 до 1100 м, т.е. в пределах полезной длины сортировочного пути, с шагом 50 м. При каждом значении  $s_n$  определялись параметры ОДР (ширина  $E$  и расстояние от начала координат  $R_{\min}$ ); результаты расчета параметров ОДР и графики их зависимости от дальности скатывания отцепов приведены в Приложении В.

Как показал анализ полученных результатов, всю длину сортировочного пути можно разбить на три характерных области.

Первая область располагается в начале пути; на этом участке может действовать ограничение торможения на СТП отцепов с хорошими ходовыми свойствами по минимуму скорости выхода ( $u'' > 0$ ). Это происходит потому,

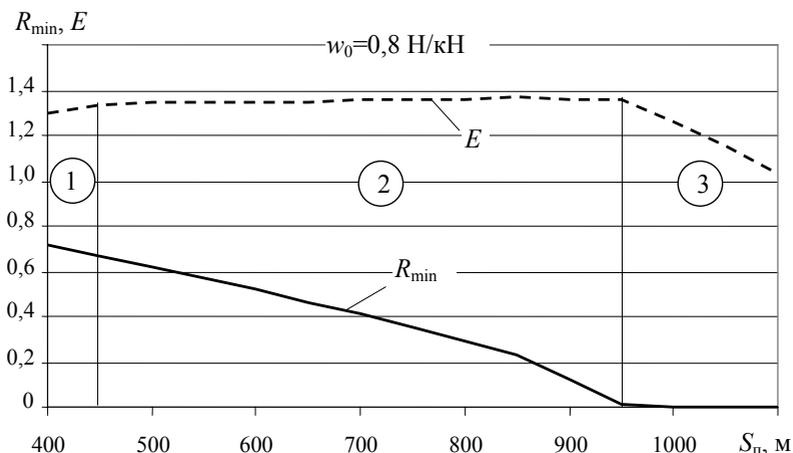
что для точек  $s_n$  в этой области пути ОДР настолько удалена от начала координат, что становится активным указанное ограничение.

В этих случаях для обеспечения в точке прицеливания минимальной скорости  $v_n=0$ , соответствующей верхней границе ОДР, необходимо дополнительно использовать торможение на ПТП. Такое распределение работы между СТП и ПТП приводит к уменьшению ширины ОДР  $E$  в начале сортировочного пути, которая увеличивается по мере роста дальности скатывания (см рис. 3.11).

Средняя часть сортировочного пути характеризуется стабильной шириной ОДР, конкретное числовое значение которой в незначительной степени зависит от сопротивления отцепа и условий скатывания. При этом и в начальной, и в средней областях пути сама ОДР смещается в сторону начала координат по мере роста дальности скатывания  $s_n$ . Это происходит вследствие роста работы сил сопротивления движению и требует соответственного уменьшения торможения отцепа на ВТП и СТП. Это смещение характеризуется уменьшением величины  $R_{\min}$ , которая изменяется по мере роста  $s_n$  практически линейно (см. рис. 3.11). Некоторое нарушение линейности функции  $R_{\min}(s_n)$  может иметь место в точках перелома профиля сортировочного пути. В рассматриваемом примере точка перелома профиля имеет координату  $s_n=845$  м; в этой точке уклон сортировочного пути меняется с 0,6‰ на 0. Этот факт отражается на графике изменения функции  $R_{\min}(s_n)$  увеличением за этой точкой ее первой производной, т.е. скорости сокращения величины  $R_{\min}$  на участке с меньшим уклоном, что вполне согласуется с закономерностями процесса скатывания.

Наконец, при некоторой дальности скатывания  $s_n$  величина  $R_{\min}$  обращается в нуль, что соответствует третьей области сортировочного пути. При этом линия  $h_{\min}''(h')$ , ограничивающая ОДР снизу, обращается в точку с координатами  $(h'_0, h''_0)$ , где  $h'_0 \geq 0$ ,  $h''_0 = 0$ . При дальнейшем увеличении дальности  $s_n$  ширина ОДР быстро уменьшается и при большом сопротивлении движе-

нию отцепа может достичь нуля ещё до конца сортировочного пути. Это приводит к существенному уменьшению маневренности при выборе режимов торможения таких отцепов и к возможному возникновению при этом противоречий между требованиями интервального и прицельного регулирования их скорости.



**Рисунок 3.11** - Зависимости параметров ОДР от дальности скатывания отцепа при встречном ветре

Перечисленные общие закономерности изменения параметров ОДР трансформируются определенным образом в зависимости от сопротивления движению отцепа, а также скорости и направления ветра. Так, для отцепов, не относящихся к ХБ ( $w_0 > 0,8 \text{ Н/кН}$ ), отсутствует ограничение минимальной скорости выхода из СТП и, соответственно, нет роста ширины ОДР в начальной части графика  $E(s_{\text{п}})$ . Для отцепов с достаточно большим сопротивлением ( $w_0 > 2,5 \text{ Н/кН}$ ) расстояние  $R_{\min} = 0$  уже в начале сортировочного пути, так что для таких отцепов зависимость  $E(s_{\text{п}})$  относится к третьему типу; при этом дальность скатывания таких отцепов ограничена.

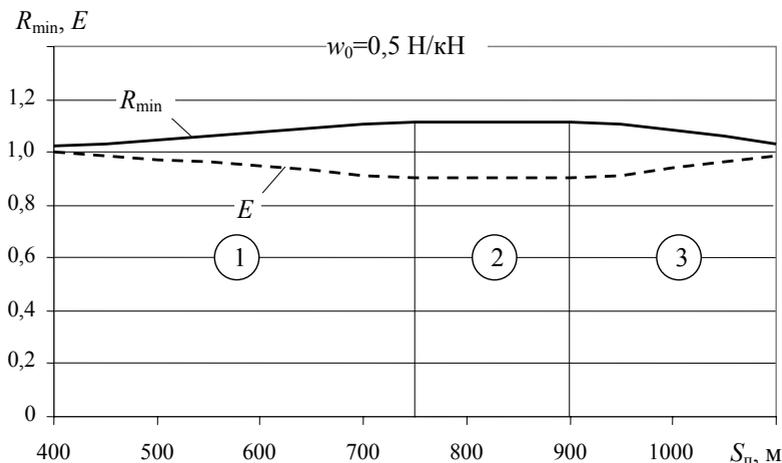
Отцепы из нескольких вагонов в основном подчиняются тем же закономерностям, что и одиночные вагоны. При этом различия заключаются в том, что такие отцепы при одной и той же скорости ветра имеют несколько

меньшее удельное сопротивление движению от среды и ветра. В результате у таких отцепов при тех же условиях ограничение ширины ОДР по скорости  $u''_{\min}$  несколько меньше, чем у одиночных вагонов, однако, действует оно на более дальнем расстоянии. Одновременно с этим несколько медленнее уменьшается расстояние  $R_{\min}$  (см. Приложение В).

Существенно изменяются условия скатывания отцепов с малым сопротивлением ( $w_0=0,5$  Н/кН) при достаточно сильном попутном ветре, когда уклон сортировочного пути становится ускоряющим. В этом случае весь сортировочный путь также можно разделить на три области с различными особенностями динамики скатывания отцепов.

На начальном участке сортировочного пути с ростом дальности скатывания отцепа  $s_n$  расстояние  $R_{\min}$  от нижней границы ОДР (линия  $h''_{\min}(h')$ ) до начала координат увеличивается (см. рис. 3.12, область 1); при этом ширина ОДР соответственно уменьшается, поскольку положение ее верхней границы (линия  $h''_{\max}(h')$ ) остается неизменным. Это происходит, потому что здесь остается активным ограничение торможения отцепа на СТП по минимальной скорости выхода  $u'' > 0$ . Следует добавить, что при данном режиме движения отцепа (заданная скорость в точке прицеливания  $v_n=0$ ) такое же ограничение скорости действует и на ПТП ( $u''' > 0$ ). Поэтому фактическая скорость отцепа в точке прицеливания будет больше заданной, т.е.  $v_n > 0$ , так как из-за ограничений на торможение на СТП и ПТП часть кинетической энергии отцепа остается непогашенной; схема подобного режима движения отцепа показана на рис 3.10, в. Нижней линии ОДР  $h''_{\min}(h')$  соответствуют такие режимы, при которых на ПТП используется полное торможение ( $h''' = H'''$ ), а торможение на СТП определяется из условия обеспечения в точке  $s_n$  допустимой максимальной скорости при соударении  $v_{нд}$ . Поэтому при ускоряющем профиле пути с ростом дальности  $s_n$  скорость выхода из ПТП  $u'''$  будет уменьшаться и при некотором критическом значении  $s_n^*$  достигнет минимально допустимой

величины  $u''_{\min} = 0,05$  м/с. Дальнейшее увеличение торможения на СТП может вызвать остановку отцепа на ПТП; следовательно, ограничение скорости выхода из СТП величиной  $u''_{\min}$ , при которой отцеп с полным торможением на ПТП выходит из нее с минимальной возможной скоростью, является еще одним типом ограничения режимов торможения на горке.



**Рисунок 3.12** - Зависимости параметров ОДР от дальности скатывания отцепа при попутном ветре

Для примера на рис. 3.13, а показаны графики скорости движения ОХ ( $w_0 = 0,5$  Н/кН) при попутном ветре ( $v_{\text{вет}} = -5,0$  м/с) и различной дальности скатывания  $s_{п}$ . Как видно из данного рисунка, с ростом величины  $s_{п}$  потребная скорость выхода из ПТП уменьшается и достигает минимума  $u''_{\min} = 0,05$  м/с при  $s_{п} = 720$  м. На рис. 3.13, б показаны соответствующие данным режимам движения изменения параметров ОДР (ширины  $E$  и расстояния от начала координат  $R_{\min}$ ).



В средней части сортировочного пути (для рассматриваемого примера  $s_n \in [720, 942]$ ) величины  $R_{\min}$  и  $E$  остаются неизменными (см. рис. 3.12, область 2), поскольку здесь продолжают действовать указанные выше ограничения.

Характерно, что для всех режимов ОДР при данных значениях  $s_n$  будет реализована одна и та же минимальная скорость выхода из ПТП  $u''_{\min} = 0,05$  м/с. При этом в любой точке указанной области значений  $s_n$  скорость рассматриваемого отцепа будет выше допустимой величины ( $v_n > 1,5$  м/с). Таким образом, приведенный пример показывает, что при определенных сочетаниях параметров отцепа и условий скатывания, когда уклон сортировочного пути становится ускоряющим, может не существовать режимов торможения, при которых возможно обеспечить допустимую скорость отцепа в точке прицеplивания, если горка оборудована сосредоточенными тормозными позициями. Очевидно, что в этом случае необходимо применить дополнительное торможение отцепа тормозными башмаками при его приближении к стоящим в указанной зоне вагонам.

При следовании отцепа на последний участок пути ( $s_n \geq s_n^{**} = 942$  м), расположенный на горизонтальной площадке (рис. 3.13, а), суммарная работа сил сопротивления начинает возрастать. Это приводит к уменьшению торможения на СТП и соответствующему смещению линии  $h''_{\min}(h')$  к началу координат (см. рис. 3.13, б). Указанное смещение, в свою очередь, приводит к уменьшению в ОДР расстояния  $R_{\min}$  и одновременному увеличению ее ширины  $E$ , поскольку положение линии  $h''_{\max}(h')$  остается неизменным (см. рис. 3.12, область 3). Последнее обстоятельство объясняется тем, что для этого участка пути ограничение минимальной скорости выхода из СТП  $u''_{\min} = 0,05$  м/с продолжает действовать.

Для отцепов с несколько большим, чем у ОХ, сопротивлением ( $w_0 = 0,8$  Н/кН) может отсутствовать указанная выше начальная область; при

дальнейшем увеличении сопротивления  $w_0$  характер изменения величин  $R_{\min}$  и  $E$  становится подобным тому, который имеет место при встречном ветре.

Для длинных отцепов перечисленные закономерности в основном сохраняются, однако изменения величин  $R_{\min}$  и  $E$  происходят менее интенсивно.

### **3.6. Анализ работы тормозных сил при скатывании отцепа с горки**

Дальность скатывания отцепов  $s_{\Pi}$  оказывает определенное влияние и на общую энергетическую высоту  $H_T$ , погашаемую всеми тормозными позициями по пути скатывания отцепа. Для анализа взаимосвязи указанных параметров при имитационном моделировании скатывания каждого из отцепов, рассматриваемых в данном разделе (см. п. 3.3), была определена величина  $H_T = h' + h'' + h'''$ . При этом для каждого сочетания параметров отцепов и условий их скатывания определялось два значения  $H_T$  – минимальное  $H_{T \min}$  и максимальное  $H_{T \max}$  (см. табл. 3.8). Как было установлено, указанные значения соответствуют двум крайним режимам торможения отцепа – быстрого ( $H_{T \min}$ ) и медленного ( $H_{T \max}$ ) скатывания.

Учитывая, что выбор режима торможения сказывается на величине  $H_T$ , а следовательно и на расходах энергии, связанных с торможением, для каждого рассматриваемого отцепа, кроме величин  $H_{T \min}$  и  $H_{T \max}$ , определялись их абсолютная  $\Delta H_T = H_{T \max} - H_{T \min}$  и относительная  $\delta H_T = \Delta H_T / H_{T \max}$  разности; указанные параметры также приведены в табл. 3.8. Как показывает анализ полученных результатов, в большинстве случаев с ростом дальности скатывания потребные величины  $H_{T \min}$  и  $H_{T \max}$  уменьшаются, причем тем быстрее, чем больше сопротивление движению отцепа. Исключение составляет ОХ, скатывающийся при попутном ветре достаточно высокой скорости ( $v_{\text{вет}} = -5$  м/с). Для указанного отцепа величина  $H_T$  с ростом дальности скатывания незначительно увеличивается (см. табл. 3.8). В то же время абсолютная  $\Delta H_T$  и особенно относительная  $\delta H_T$  разности с увеличением дальности скатывания увеличиваются.

Таблица 3.8

## Работа тормозных сил при скатывании отцепа с горки

$V_{ветр}$ М/с	$S_{пр}$ М	Основное удельное сопротивление движению отцепа $w_0$ , Н/кН											
		0,5				0,8				1,5			
		$H_{т min}$	$H_{т max}$	$\Delta H_{т}$	$\delta H_{т, \%}$	$H_{т min}$	$H_{т max}$	$\Delta H_{т}$	$\delta H_{т, \%}$	$H_{т min}$	$H_{т max}$	$\Delta H_{т}$	$\delta H_{т, \%}$
5	400	2,684	3,407	0,723	21,221	2,449	3,246	0,797	24,553	1,903	2,799	0,896	32,011
	700	2,484	3,294	0,81	24,59	2,035	2,865	0,83	28,97	1,027	1,789	0,762	42,594
	1000	2,063	2,871	0,808	28,144	1,379	2,167	0,788	36,364	0,074	0,189	0,189	71,863
-5	400	3,153	3,691	0,538	14,576	3,025	3,592	0,567	15,785	2,727	3,358	0,631	18,791
	700	3,271	3,776	0,505	13,374	3,019	3,616	0,597	16,51	2,433	3,091	0,658	21,288
	1000	3,239	3,763	0,524	13,925	2,85	3,506	0,656	18,711	1,956	2,599	0,643	24,74
5	400	2,817	3,456	0,639	18,49	2,632	3,316	0,684	20,627	2,199	2,962	0,763	25,76
	700	2,719	3,408	0,689	20,217	2,366	3,091	0,725	23,455	1,519	2,279	0,76	33,348
	1000	2,474	3,187	0,713	22,372	1,923	2,654	0,731	27,543	0,753	1,264	0,511	40,427
-5	400	3,092	3,63	0,538	14,821	2,967	3,528	0,561	15,901	2,676	3,287	0,611	18,588
	700	3,178	3,699	0,521	14,085	2,934	3,532	0,598	16,931	2,363	2,988	0,625	20,917
	1000	3,143	3,682	0,539	14,639	2,771	3,396	0,625	18,404	1,906	2,524	0,618	24,485

$V_{ветр}$ М/с	$S_{пр}$ М	Основное удельное сопротивление движению отцепа $w_0=2,5$ Н/кН											
		одиночный				длинный				длинный			
		$H_{т min}$	$H_{т max}$	$\Delta H_{т}$	$\delta H_{т, \%}$	$H_{т min}$	$H_{т max}$	$\Delta H_{т}$	$\delta H_{т, \%}$	$H_{т min}$	$H_{т max}$	$\Delta H_{т}$	$\delta H_{т, \%}$
5	400	1,182	2,216	1,034	46,661	1,612	2,436	0,824	33,826				
	500	0,786	1,504	0,718	47,739	1,207	1,982	0,775	39,102				
	600	0,347	0,833	0,486	58,343	0,873	1,503	0,63	41,916				
-5	400	2,298	2,957	0,659	22,286	2,259	2,894	0,635	21,942				
	700	1,582	2,222	0,64	28,803	1,539	2,149	0,61	28,385				
	1000	0,829	1,265	0,436	34,466	0,797	1,217	0,42	34,511				

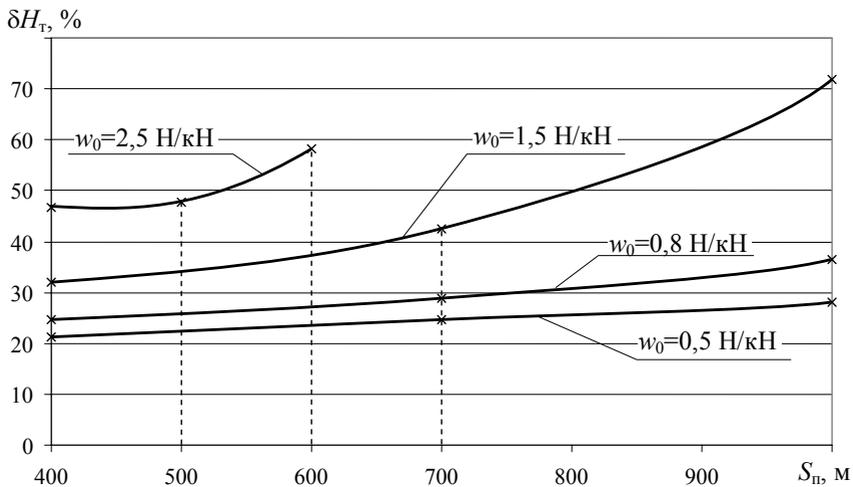
Графики зависимости относительной разности  $\delta H_r$  от потребной дальности скатывания для отцепов с разным сопротивлением движению  $w_0$  приведены на рис. 3.14 (*a* – встречный ветер, *b* – попутный ветер).

Анализ данных графиков показывает, что выбор режима торможения весьма существенно влияет на величину суммарной погашаемой высоты  $H_r$ , особенно с увеличением сопротивления движению и дальности скатывания.

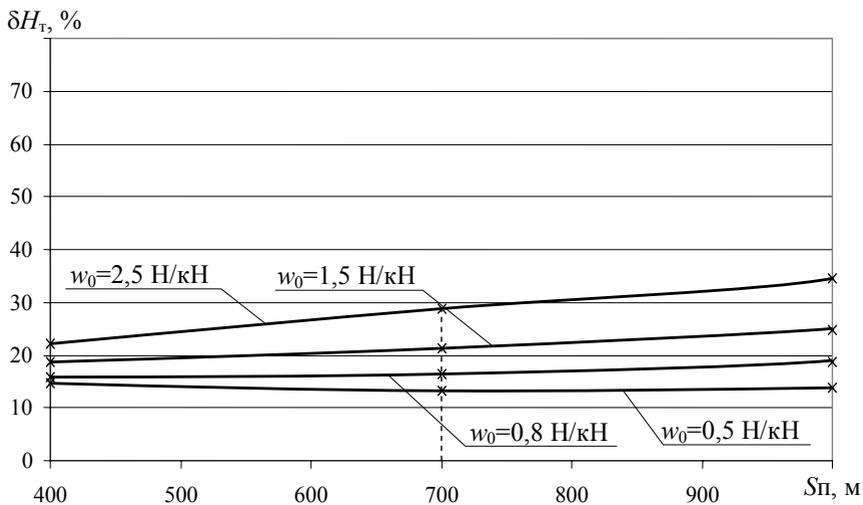
Так, при встречном ветре сокращение погашаемой высоты при быстром режиме скатывания составляет в 30-40%, а в отдельных случаях доходит до 70% (см. табл. 3.8). При попутном ветре, а также для отцепов из нескольких вагонов указанное сокращение несколько меньше (15-30%), хотя иногда достигает 40 и более процентов. Указанные величины, однако, не могут служить непосредственной оценкой возможного сокращения расходов на торможение вагонов на горке, поскольку те зависят в основном от числа включений замедлителей при регулировании скорости скатывания отцепов. В то же время погашаемая высота зависит, главным образом, от длины участка торможения, т.е. от длительности включения замедлителей. Определенную оценку энергоемкости отдельных режимов торможения, принадлежащих ОДР, может дать диаграмма распределения числа замедлителей, использование которых необходимо для реализации этих режимов.

Каждый режим **h**, принадлежащий ОДР, может быть реализован при использовании определенного числа замедлителей  $K_{из}^{(j)}$  на *j*-й тормозной позиции,  $j=1 \dots K_{тп}$ ; здесь  $K_{тп}$  – общее число тормозных позиций по маршруту скатывания отцепа ( $K_{из}^{(j)} \subset [0, K_3^{(j)}$ ], где  $K_3^{(j)}$  – общее число замедлителей на *j*-й ТП). В этой связи ОДР  $\Omega$  может быть разделена на непересекающиеся области (подмножества режимов)  $\omega_1 \cup \omega_2 \dots \cup \omega_y = \Omega$ ; при этом каждое подмножество  $\omega_j$  характеризуется списком  $\{K_{из}^{(j)}, j=1 \dots K_{тп}\}$  значений числа используемых замедлителей и соответствующей величиной  $E_{отцп}$  расхода энергии на торможение отцепа.

*a)*



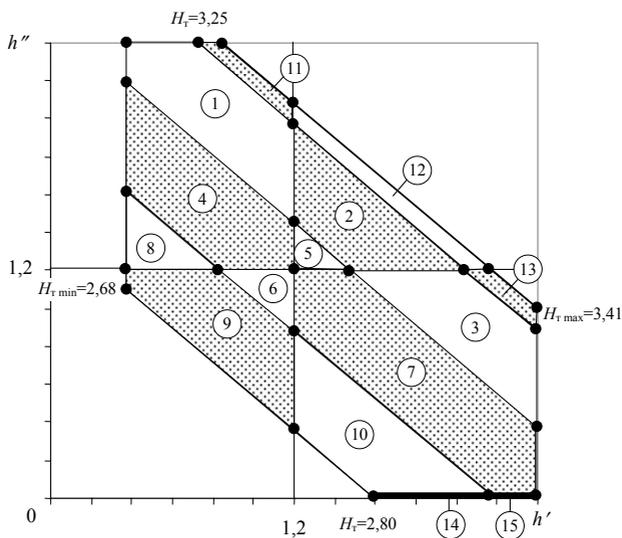
б)



**Рисунок 3.14** - Зависимости относительного сокращения погашаемой энергетической высоты  $\delta H_T, \%$ , от дальности скатывания отцепа: а – при встречном ветре; б – при попутном ветре

Число возможных областей  $y$  зависит от размеров и положения ОДР в области возможных режимов торможения. Для примера на рис. 3.15 показана подобная диаграмма для ОХ, скатывающегося в неблагоприятных зимних условиях на расстояние  $s_{\text{н}}=400$  м. На данной диаграмме ОДР разделена на  $y=15$  областей, для реализации режимов торможения каждой из которых используется определенное число замедлителей ВТП, СТП и ПТП, что требует соответствующих затрат электроэнергии (см. табл. 3.9). Как видно из приведенных данных, наименьший расход электроэнергии для реализации режимов торможения, принадлежащих ОДР и обеспечивающих требования целевого регулирования, имеет место в областях 6 и 15 и составляет 0,28 кВт·час. Следует заметить, что для реализации режимов торможения двух указанных областей используются разные замедлители горки, что приводит к существенным различиям в скорости и времени скатывания отцепа.

Максимальные затраты электроэнергии соответствуют режимам торможения, находящимся в области 5 и составляют 0,53 кВт·час (см. табл. 3.9), что почти в два раза выше минимального значения. При этом нужно заметить, что выбор режима торможения нельзя производить только по условиям минимизации расходов электроэнергии из-за необходимости обеспечения условий разделения отцепов на стрелках. Таким образом, выбор оптимальных режимов торможения отцепов состава представляет собой сложную неоднозначную задачу, для решения которой необходимо учитывать большое число взаимосвязанных факторов, влияющих на качество сортировочного процесса.



**Рисунок 3.15** - Диаграмма распределения числа используемых замедлителей в ОДР отцепа ОХ в зимних условиях

*Таблица 3.9*

Использование замедлителей для реализации режимов торможения ОДР отцепа ОХ в зимних условиях

Номер области $i$	Число используемых замедлителей			Расход электроэнергии $E_{отц_i}$ , кВт·час
	ВТП $K'_{из}$	СТП $K''_{из}$	ПТП $K'''_{из}$	
1	1	2	1	0,388
2	2	2	1	0,512
3	2	1	1	0,388
4	2	2	2	0,405
5	2	2	2	0,529
6	1	1	2	0,281
7	2	1	2	0,405
8	1	2	3	0,422
9	1	1	3	0,298
10	2	1	3	0,422
11	1	2	0	0,371
12	2	2	0	0,495
13	2	1	0	0,371
14	2	0	3	0,298
15	2	0	2	0,281

# ГЛАВА 4

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗДЕЛЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

### 4.1. Постановка задачи исследований

Каждый режим торможения  $\mathbf{h}=\{h', h''\}$ , принадлежащий ОДР ( $\mathbf{h} \in \Omega$ ), обеспечивает требования прицельного регулирования, т.е. докатывание отцепов до точки прицеливания с допустимой скоростью. Поэтому для обоснованного выбора оптимального режима торможения необходимо исследовать его влияние на качество интервального регулирования скорости отцепов.

Качество интервального регулирования характеризуется вероятностью неразделения маршрутов скатывания отцепов [4]. Указанная вероятность обратно пропорциональна величине интервалов  $\delta t$  между отцепами на разделительных стрелках; интервалы  $\delta t$ , в свою очередь, определяются режимами торможения отцепов. Таким образом, возникает задача анализа влияния режимов торможения отцепов на величину интервалов между ними на стрелках разделения маршрутов их скатывания с горки.

Очевидно, что режим торможения  $i$ -го отцепов влияет на интервалы  $\delta t$  с двумя смежными отцепами – предыдущим  $(i-1)$ -м и последующим  $(i+1)$ -м. Следовательно, для исследования закономерностей процесса регулирования интервалов между отцепами необходимо рассматривать расчетную группу из трех отцепов. При этом целесообразно анализировать влияние режима торможения  $i$ -го отцепов  $\mathbf{h}_i$  на интервалы  $\delta t_{i-1}$  и  $\delta t_i$  при некоторых фиксированных режимах торможения  $\mathbf{h}_{i-1}$  и  $\mathbf{h}_{i+1}$  смежных с ним отцепов. В этом случае указанные интервалы определяются как

$$\begin{aligned} \delta t_{i-1}(\mathbf{h}_i) &= t_{0,i-1} + t_i(\mathbf{h}_i, \sigma_{i-1}) - \tau_{i-1}(\sigma_{i-1}) \\ \delta t_i(\mathbf{h}_i) &= t_{0,i} + t_{i+1}(\sigma_i) - \tau_i(\mathbf{h}_i, \sigma_i), \end{aligned} \tag{4.1}$$

где  $t_{0,i-1}, t_{0,i}$  – начальные интервалы на вершине горки между отцепами состава, соответственно  $(i-1)$ -м и  $i$ -м, а также  $i$ -м и  $(i+1)$ -м;

$t(\sigma)$  – время скатывания отцепа от момента отрыва до момента занятия изолированного участка (ИЗУ) разделительной стрелки  $\sigma$ ;

$\tau(\sigma)$  – то же, до момента освобождения ИЗУ разделительной стрелки  $\sigma$ .

Следует заметить, что в приведенных выражениях величины  $\tau_{i-1}$  и  $t_{i+1}$  являются постоянными, поскольку режимы торможения  $(i-1)$ -го и  $(i+1)$ -го отцепов не варьируются; постоянными являются и начальные интервалы  $t_0$ , так как скорость ролпуска в рамках данной задачи принята постоянной.

Очевидно, что с позиций интервального регулирования наилучшим для среднего отцепа расчетной группы из трех отцепов является такой режим торможения, при котором меньший из двух интервалов в группе обращается в максимум, т.е.  $\min\{\delta t_1, \delta t_2\} \rightarrow \max$ . Учитывая, что увеличение торможения среднего отцепа  $h_2$  ведет к увеличению интервала  $\delta t_1$  и, соответственно, к уменьшению  $\delta t_2$ , приведенное выше условие равносильно условию  $\delta t_1 = \delta t_2 = \overline{\delta t} \rightarrow \max$ , если диапазоны изменения указанных интервалов имеют общую область. В результате возникает задача поиска в ОДР области таких режимов торможения  $h_2$ , при которых выполняется равенство  $\delta t_1 = \delta t_2$ . Кроме того, необходимо исследовать характер изменения величины  $\overline{\delta t}$  в указанной области и установить режим  $h_2$ , при котором величина  $\overline{\delta t}$  максимальна.

Следует учесть, что в некоторых случаях при реализации режимов торможения, оптимальных по условиям интервального регулирования, могут не выполняться требования прицельного регулирования, либо не обеспечиваться необходимое сокращение энергетических затрат на торможение вагонов. В этих случаях необходимо рассмотреть возможность выполнения указанных требований за счет некоторого уменьшения интервалов  $\delta t$  на стрелках. С этой целью необходимо в ОДР  $\Omega$  найти область режимов торможения, допустимых по условиям интервального регулирования скорости отцепов (т.е. область, в которой  $\delta t_{1,2} \geq \delta t_{\min}$ ). В этой связи возникает необходимость ис-

следования взаимосвязи между режимом торможения среднего отцепа  $\mathbf{h}_2 = \{h', h''\}$  и интервалами  $\delta t_1, \delta t_2$ , которые будут иметь место на стрелках разделения  $\sigma_1, \sigma_2$  этого отцепа с двумя смежными отцепами.

Для успешной реализации установленного режима торможения необходимо, чтобы между смежными отцепами группы обеспечивались допустимые интервалы на первых замедлителях ВТП и СТП. Эти интервалы необходимы для перевода тормозных балок замедлителей из расторможенного положения в заторможенное либо обратно. С этой целью необходимо исследовать влияние режимов торможения на величины интервалов между отцепами на замедлителях, а также установить ограничения этих режимов по указанным условиям.

Таким образом, для решения задачи оптимизации режимов торможения необходимо предварительно исследовать их влияние на интервалы между отцепами на разделительных элементах.

#### **4.2. Определение максимальных интервалов между отцепами на разделительных стрелках**

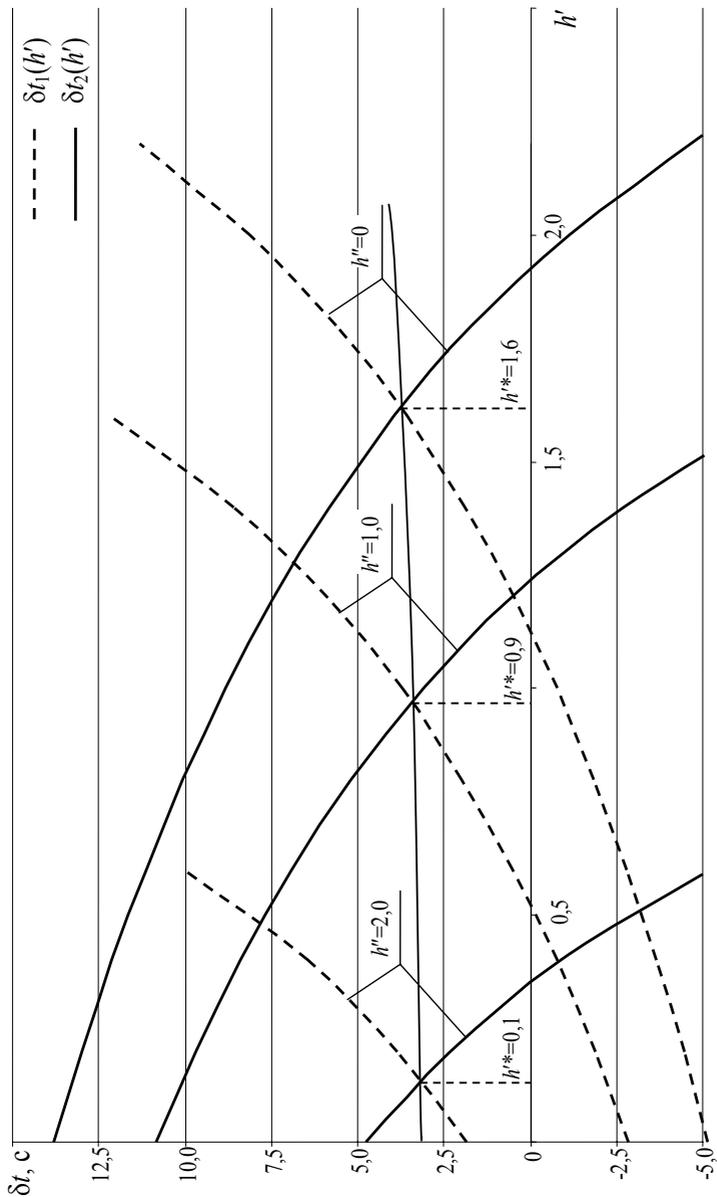
При исследованиях были рассмотрены расчётные группы из трёх отцепов, в которых первый и третий отцепы – одиночные вагоны ОП (четырёхосные полувагоны на роликовых подшипниках с параметрами  $Q=22$  т,  $w_0=4,5$  Н/кН). В качестве среднего принимались одно- и трёхвагонные отцепы, параметры которых варьировались в соответствии с табл. 3.2. Моделирование скатывания производилось при неблагоприятных условиях со встречным ветром и благоприятных – с попутным (см. табл. 3.3).

Режимы скатывания отцепов были приняты следующими. Начальная скорость всех отцепов постоянна ( $v_0=1,7$  м/с); I-й и III-й отцепы ОП скатывались без торможения ( $\mathbf{h}_1=\{0,0\}$ ,  $\mathbf{h}_3=\{0,0\}$ ). При таких условиях, как было отмечено в п. 4.1, значения времени скатывания I-го отцепа  $\tau_1(\sigma_1)$  за стрелку разделения со II-м отцепом  $\sigma_1$  и время скатывания III-го отцепа  $t_3(\sigma_2)$  до стрелки разделения со II-м отцепом  $\sigma_2$  являются постоянными, а интервалы

$\delta t_1$  и  $\delta t_2$  изменяются только при варьировании режима торможения II-го отцепа  $\mathbf{h}$  (4.1).

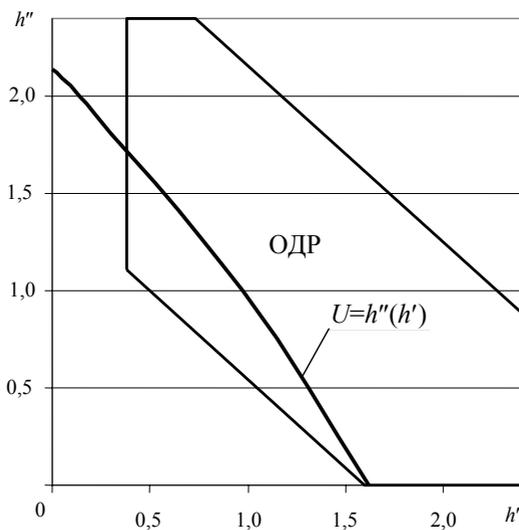
Режим торможения  $\mathbf{h}=(h', h'')$  среднего отцепа группы определяется таким образом, чтобы обеспечить равенство интервалов  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  на раздельных стрелках. Действительно, значения времени скатывания II-го отцепа до стрелки  $\sigma_1$  разделения с I-м отцепом  $t_2(\mathbf{h}, \sigma_1)$  и за стрелку  $\sigma_2$  разделения с III-м отцепом  $\tau_2(\mathbf{h}, \sigma_2)$  зависят от режима торможения  $\mathbf{h}=(h', h'')$  и в соответствии с (4.1) определяют величины интервалов  $\delta t_1(\mathbf{h}_2)$  и  $\delta t_2(\mathbf{h}_2)$ . Очевидно, что при каждом значении  $h''$  с ростом  $h'$  возрастают значения  $t_2$  и  $\tau_2$  и поэтому величина  $\delta t_1$  возрастает, а  $\delta t_2$  – уменьшается (4.1). Для примера на рис. 4.1 показаны графики  $\delta t_1(h')$  и  $\delta t_2(h')$  для стрелок  $\sigma_1=5$  и  $\sigma_2=5$  при трёх фиксированных значениях  $h''$  - 0, 1,0 и 2,0 м эн. в., построенные для расчетной группы отцепов ОП-ОХ-ОП, скатывающихся в неблагоприятных зимних условиях. Тогда если при заданной величине  $h''$  в некотором интервале значений  $h' \in [a, b]$  выполняются условия  $\delta t_1(a) < \delta t_2(a)$  и  $\delta t_1(b) > \delta t_2(b)$ , то существует значение  $h'^* \in [a, b]$ , при котором  $\delta t_1(h'^*) = \delta t_2(h'^*) = \overline{\delta t}$ , а графики  $\delta t_1(h')$  и  $\delta t_2(h')$  пересекаются в точке  $h'^*$ .

Как видно из рис. 4.1, при  $h''=0$  графики  $\delta t_1(h')$  и  $\delta t_2(h')$  пересекаются в точке  $h'^*=1,62$  м эн. в.; при этом величины интервалов  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$ , соответственно, в первой и второй парах отцепов одинаковы и составляют  $\overline{\delta t}=3,75$  с. Аналогично при  $h''=1,0$  м эн. в. –  $h'^*=0,97$  м эн. в. и  $\overline{\delta t}=3,43$  с; при  $h''=2,0$  м эн. в. –  $h'^*=0,14$  м эн. в. и  $\overline{\delta t}=3,16$  с.



**Рисунок 4.1** - Графики зависимости интервалов  $\delta t_1$ ,  $\delta t_2$  на разделительных стрелках  $\sigma_1=5$ ,  $\sigma_2=5$  от степени торможения ОХ на ВПП

Полученные таким образом точки  $(h'^*, h'')$  позволяют построить линию  $U=h''(h')$ , все точки которой определяют режимы торможения  $\mathbf{h}$  среднего отцепа, обеспечивающие равенство интервалов  $\delta t_1(\mathbf{h})=\delta t_2(\mathbf{h})$  на стрелках его разделения со смежными отцепами; для рассмотренного примера при  $\sigma_1=5$ ,  $\sigma_2=5$  линия  $U=h''(h')$  показана на рис. 4.2. Очевидно, что характер линий  $U=h''(h')$  и их положение в области возможных режимов торможения среднего отцепа, а также величины интервалов  $\overline{\delta t}$  будут зависеть от выбора стрелок разделения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , соответственно, в первой и второй паре отцепов расчетной группы.



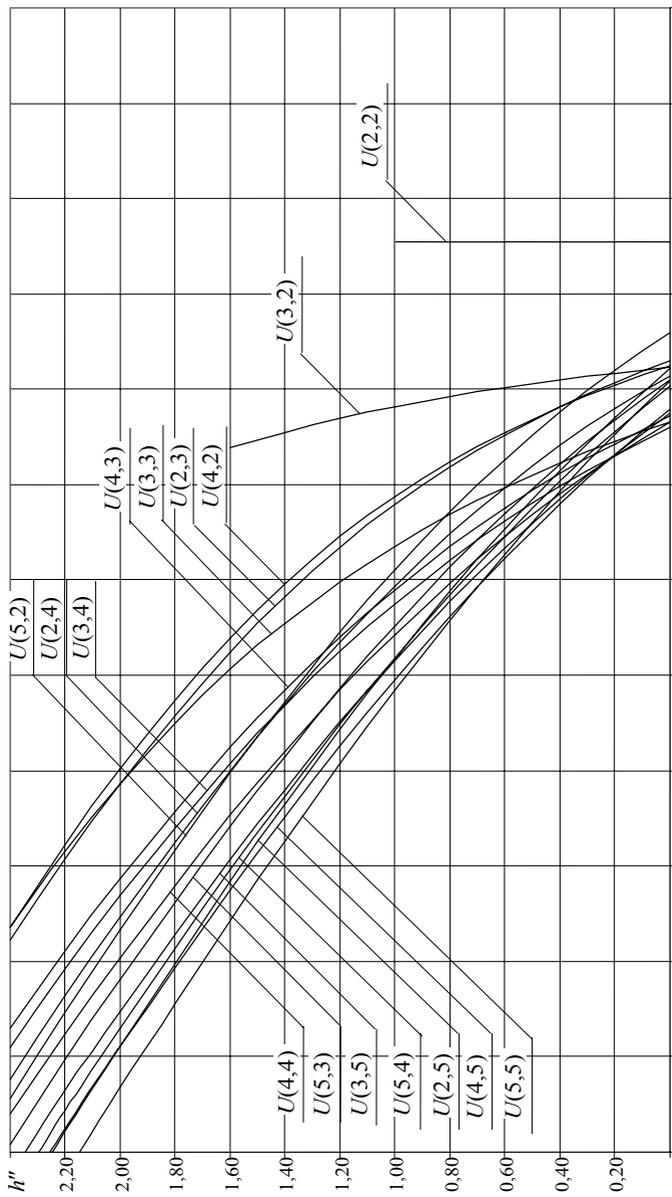
**Рисунок 4.2** - Линия режимов торможения  $U=h''(h')$ , обеспечивающих равенство интервалов  $\delta t_1, \delta t_2$  на разделительных стрелках  $\sigma_1=5, \sigma_2=5$

Для анализа указанного влияния было выполнено моделирование скатывания отцепов расчетной группы при всех возможных комбинациях номеров разделительных стрелок  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  (всего  $4 \cdot 4=16$  комбинаций). Для каждой комбинации номеров  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  варьировалась величина  $h''$  в пределах от 0 до

$h''_{\max}$  ( $h''_{\max} \leq 2,4$  м эн. в.) с шагом 0,2 м эн. в. и при каждом значении  $h''$  определялось значение  $h'^*$ , при котором интервалы  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  одинаковы. По результатам указанных расчетов построены линии  $U(\sigma_1, \sigma_2)=h''(h')$  (см. Приложение Г). Как было указано выше, каждая такая линия определяет для среднего отцепа расчетной группы множество таких режимов торможения  $\mathbf{h}=(h', h'')$ , при которых обеспечивается равенство интервалов  $\delta t_1(\mathbf{h})=\delta t_2(\mathbf{h})$  для данной комбинации номеров стрелок  $\sigma_1, \sigma_2$ . Для примера на рис. 4.3 показаны линии  $U(\sigma_1, \sigma_2)$ , построенные по данным Приложения Г для расчетной группы ОП-ОХ-ОП, при всех 16 упомянутых комбинациях номеров стрелок ( $\sigma_1, \sigma_2$ ).

Как следует из анализа полученных данных, для большинства комбинаций номеров стрелок разделение линии  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  достаточно близко друг к другу (см. рис. 4.3). Исключение составляют линии  $U(2,2)$  и  $U(3,2)$ , а для длинных отцепов – и  $U(4,2)$ . Действительно, если обе пары отцепов разделяются на второй стрелке (комбинация 2-2), то очевидно, что режим торможения  $h''$  среднего отцепа на СТП никак не влияет на интервалы  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$ . При этом линия  $U(2,2)$  вертикальна, а максимальное значение  $h''_{\max} \leq h''_{\text{ном}}$  определяется по условию остановки отцепа на СТП. В двух других случаях координата входа среднего отцепа на стрелку разделения с первым отцепом меньше, чем координата выхода его из СТП; поэтому влияние торможения на этой позиции на интервалы  $\delta t$  невелико и, соответственно, наклон линий  $U(3,2)$  и  $U(4,2)$  значительно меньше остальных линий.

Следует заметить, что положение линии  $U$  в области возможных режимов торможения остается неизменным, в то время как положение ОДР может меняться при изменении потребной дальности скатывания отцепа.



**Рисунок 4.3** - Линии режимов торможения  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  с равными интервалами  $\delta t$  для всех комбинаций номеров стрелок  $(\sigma_1, \sigma_2)$

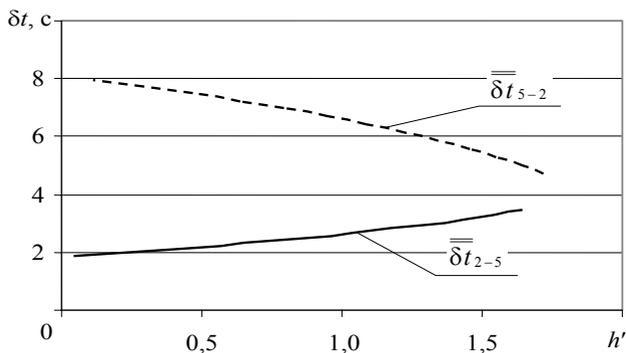
В этой связи были построены линии режимов  $U=h''(h')$  с равными интервалами  $\overline{\delta t}$  для всех рассматриваемых отцепов и условий скатывания при двух противоположных комбинациях номеров стрелок –  $\sigma_1 < \sigma_2$  ( $\sigma_1=2, \sigma_2=5$ ) и  $\sigma_1 > \sigma_2$  ( $\sigma_1=5, \sigma_2=2$ ,) (см. Приложение Г).

Как видно из приведенных данных, во многих случаях линии режимов  $U$ , обеспечивающих равенство интервалов  $\delta t_1 = \delta t_2$ , находятся за пределами ОДР. Так, например, для ОХ при попутном ветре (Приложение Г, рис. Г.2) реализация режимов, при которых обеспечивается равенство интервалов на стрелках, приводит к превышению допустимой скорости соударения отцепа в точке прицеливания. Напротив для отцепа сопротивлением  $w_0=2,5$  Н/кН в неблагоприятных зимних условиях (Приложение Г, рис. Г.7) реализация указанных режимов приводит к недокатыванию отцепа до расчетной точки. Следовательно, при выборе оптимальных режимов торможения отцепа необходимо комплексное рассмотрение указанных факторов.

Весьма важным является анализ изменения величины интервалов  $\overline{\delta t}$  вдоль полученной таким образом линии  $U=h''(h')$ , поскольку он позволяет установить режим  $h$ , при котором указанные интервалы достигают максимума.

Как показали исследования [67], величина  $\overline{\delta t}$  монотонно возрастает вдоль линии  $U$  и достигает максимума на границе ОДР; при этом направление роста определенным образом зависит от комбинации номеров стрелок ( $\sigma_1, \sigma_2$ ). Так, в соответствии с установленной закономерностью [67] в рассматриваемой расчетной группе ОП-ОХ-ОП при  $\sigma_1=2, \sigma_2=5, (\sigma_1 < \sigma_2)$  интервалы  $\overline{\delta t}$  возрастают с увеличением  $h'$  и соответственным уменьшением  $h''$  в направлении нижнего участка границы ОДР и достигают максимума  $\overline{\delta t}_{\max} = 3,47$ с при  $h'=1,64$  м эн. в.,  $h''=0$ . В противоположном случае ( $\sigma_1=5, \sigma_2=2, \sigma_1 > \sigma_2$ ) значение  $\overline{\delta t}$  увеличивается в направлении верхнего участка границы ОДР и достигает максимума  $\overline{\delta t}_{\max} = 7,93$  с на её границе при  $h'=0,11$  м эн. в.,

$h''=2,40$  м эн. в. Графики зависимостей  $\overline{\delta t}=f(h')$  для двух указанных случаев выбора стрелок  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , подтверждающие данный вывод, приведены на рис. 4.4.



**Рисунок 4.4** - Графики зависимостей интервалов  $\delta t$  на стрелках от торможения отцепа на ВТП

Для более детального анализа установленной зависимости рассмотрим сумму интервалов  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  (4.1):

$$\Sigma \delta t_{1,2} = \Sigma t_{o1,2} - \tau_1(\sigma_1) + t_3(\sigma_2) + t_2(\sigma_1) - \tau_2(\sigma_2) \quad (4.2)$$

Предварительно введем понятие участка разделения отцепов расчетной группы, который располагается между точками входа среднего отцепа на стрелку разделения  $\sigma_1$  и выхода его со стрелки  $\sigma_2$ . Тогда длину этого участка можно определить как

$$\Delta s_{yp} = |s_{вх}(\sigma_1) - s_{вых}(\sigma_2)|.$$

Как было отмечено выше, при фиксированном режиме торможения первого и третьего отцепов расчетной группы первые три слагаемых в данном выражении постоянны; в этом случае (4.2) можно записать как

$$\Sigma \delta t_{1,2} = A + t_2(h, \sigma_1) - \tau_2(h, \sigma_2) \quad (4.3)$$

где  $A = \Sigma t_{o1,2} - \tau_1(\sigma_1) + t_3(\sigma_2)$  – постоянная величина для данной группы отцепов.

Тогда очевидно, что сумма интервалов  $\Sigma \delta t_{1,2}$  будет зависеть от разности  $t_2(\sigma_1) - \tau_2(\sigma_2)$ , которая определяется как взаимным расположением стрелок  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  на плане горки, так и режимом торможения  $\mathbf{h}$  среднего отцепа на ВТП и СТП. Учитывая, что время  $t(s)$  монотонно возрастает с увеличением дальности скатывания  $s$ , знак и величина указанной разности будет зависеть от соотношения координат точки входа  $s_{\text{вх}}(\sigma_1)$  среднего отцепа на ИЗУ первой стрелки  $\sigma_1$  и точки выхода  $s_{\text{вых}}(\sigma_2)$  этого отцепа из ИЗУ второй стрелки  $\sigma_2$ .

Координата  $s_{\text{вх}}(\sigma_1)$  определяется расстоянием от вершины горки до начала ИЗУ стрелки  $\sigma_1$  и является постоянной; в то же время координата  $s_{\text{вых}}(\sigma_2)$  зависит от длины базы среднего отцепа  $b_{\text{отц2}}$  (см. рис. 4.5):

$$s_{\text{вых}}(\sigma_2) = s_{\text{вх}}(\sigma_2) + l_{\text{изу}} + b_{\text{отц2}} \quad (4.4)$$

где  $l_{\text{изу}}$  – длина изолированного участка стрелки  $\sigma_2$ .

Обозначим  $t_2(\sigma_1) = t_2(s_{\text{вх}}(\sigma_1))$  и  $\tau_2(\sigma_2) = t_2(s_{\text{вых}}(\sigma_2))$ ; тогда если  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) \leq s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ , то и  $t_2(\sigma_1) \leq \tau_2(\sigma_2)$ . Напротив, если  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) > s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ , то  $t_2(\sigma_1) > \tau_2(\sigma_2)$ . Рассмотрим различные варианты взаимного расположения разделительных стрелок первой и второй пар отцепов.

Допустим, что первая стрелка  $\sigma_1$  расположена ближе к вершине горки, чем вторая  $\sigma_2$  (т.е.  $\sigma_1 \leq \sigma_2$ ) (см. рис. 4.5). Тогда  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) \leq s_{\text{вх}}(\sigma_2)$ , и, учитывая (4.4),  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) < s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ ; следовательно, как было показано выше, разность  $\Delta t_{\text{yp}}$  в (4.3) всегда отрицательна:

$$\Delta t_{\text{yp}} = t_2(\sigma_1) - \tau_2(\sigma_2) < 0 \quad (4.5)$$

Тогда как следует из (4.3), для увеличения интервалов  $\delta t_{1,2}$  необходимо выбирать такие режимы торможения  $\mathbf{h}$  среднего отцепа, чтобы абсолютная величина разности  $|\Delta t_{\text{yp}}|$  (4.5), которую можно рассматривать как время занятия участка разделения средним отцепом группы, была минимальной. Как видно из рис. 4.5, величина  $|\Delta t_{\text{yp}}|$  обратно пропорциональна средней скорости отцепа  $\bar{V}_{\text{yp}}$  на участке разделения отцепов 1-2 и 2-3 [ $s_{\text{вх}}(\sigma_1)$ ,  $s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ ]:



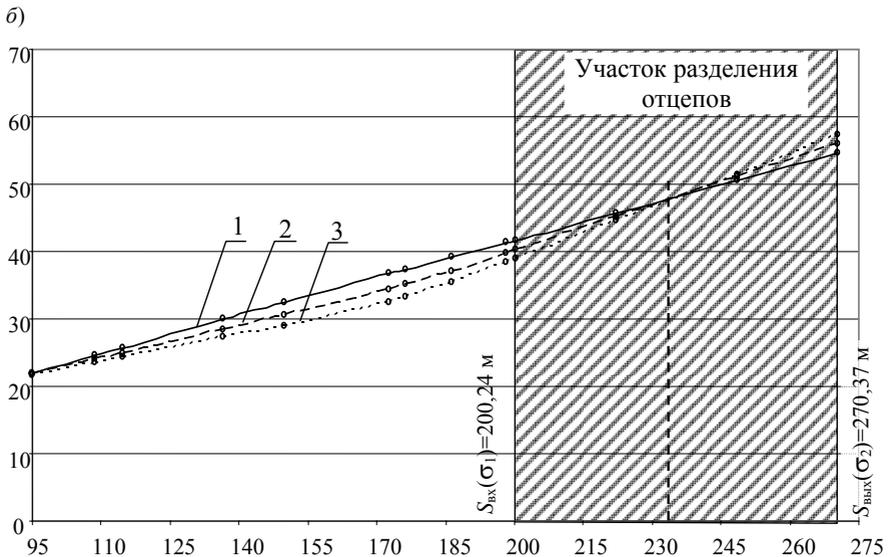
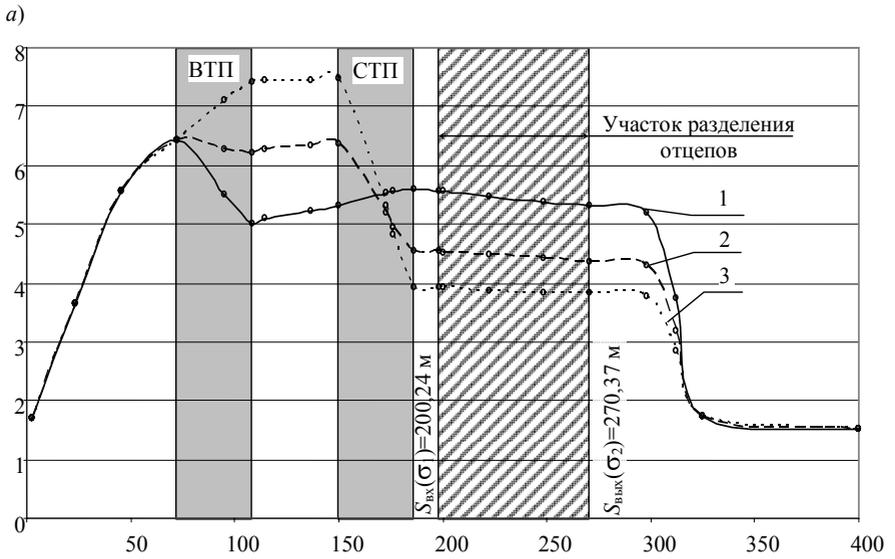
торможения. Эти режимы соответствуют разным точкам линии  $U(\sigma_1, \sigma_2)$ : 1 – на нижнем участке ОДР, 3 – на верхнем участке, 2 – промежуточная. Соответствующие режимы торможения  $h=(h'', h')$ , а также результаты расчета интервалов ((4.2)-(4.5)) приведены в табл. 4.1.

Как видно из приведенных данных, в первом рассмотренном случае ( $\sigma_1=4$  и  $\sigma_2=5$ ,  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) < s_{\text{вх}}(\sigma_2)$ ) режим 1 обеспечивает максимальную скорость ( $\bar{V}=5,43$  м/с) на участке разделения отцепов 1-3, при которой время движения ОХ отцепа между точками  $s_{\text{вх}}(\sigma_1)$  и  $s_{\text{вх}}(\sigma_2)$  минимально ( $|\Delta t_{\text{уп}}|=12,92$  с). В то же время 1-й режим, при котором торможение отцепа на ВТП максимально (см. рис. 4.6, а), обеспечивает наибольшее время его скатывания до стрелки  $\sigma_1$  ( $t_2(4)=41,65$  с). Вместе эти два фактора позволяют обеспечить при 1-м режиме максимальные и равные интервалы на разделительных стрелках  $\sigma_1=4$  и  $\sigma_2=5$  ( $\delta t_1=\delta t_2=4,36$  с). Следует заметить, что в данном случае 1-й режим торможения обеспечивает максимальное время скатывания отцепа до начала участка разделения и минимальное – до его конца; противоположный 3-й режим дает обратные результаты; при этом, очевидно, что внутри участка графики  $T(s)$  имеют определенную точку пересечения (на рис. 4.6, б показана пунктиром).

Другой возможный вариант взаимного размещения разделительных стрелок возникает при условии  $\sigma_1 > \sigma_2$ . В данном случае  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) > s_{\text{вх}}(\sigma_2)$ , однако взаимное положение точек  $s_{\text{вх}}(\sigma_1)$  и  $s_{\text{вых}}(\sigma_2)$  неоднозначно, так как вторая величина зависит от длины среднего отцепа (4.2).

Вначале рассмотрим случай, когда длина среднего отцепа невелика и не превышает промежуточное расстояние  $l_{\text{пп}}$  между ИЗУ стрелок  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Тогда, как видно из рис. 4.7,  $s_{\text{вых}}(\sigma_2) < s_{\text{вх}}(\sigma_1)$ , и поэтому

$$\Delta t_{\text{уп}} = t_2(\sigma_1) - \tau_2(\sigma_2) > 0 \quad (4.7)$$



**Рисунок 4.6** - Динамика скачивания отцепа ОХ при различных режимах регулирования интервалов  $\delta t_1, \delta t_2$  на стрелках  $\sigma_1=4, \sigma_2=5$ : а – графики скорости; б – графики времени. На рисунке цифрами обозначены: 1 – режим на нижнем участке границы ОДР; 2 – промежуточный режим; 3 – режим на верхнем участке границы ОДР

Расчет интервалов  $\delta$  между отсечами ОП-ОХ-ОП при различных условиях

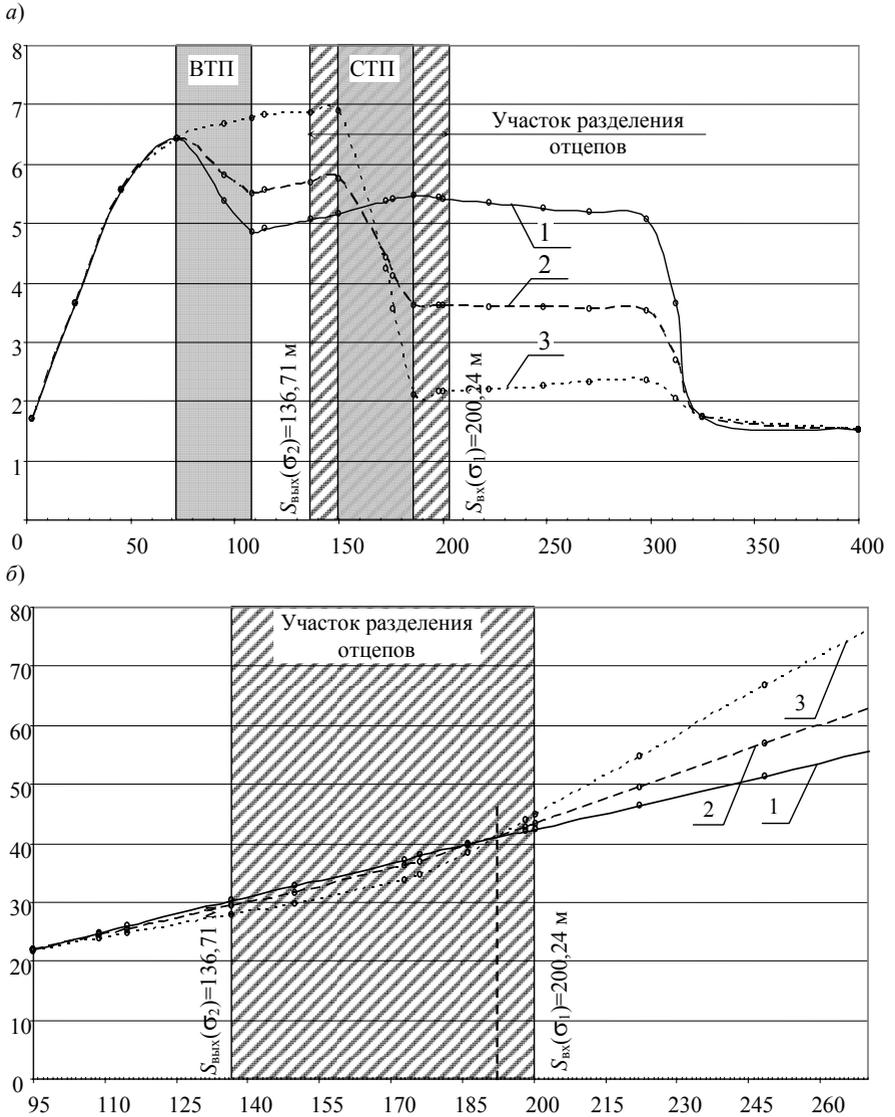
	Разделительные стрелки							
	$\sigma_1=4; \sigma_2=5$		$\sigma_1=4; \sigma_2=2$		$\sigma_1=4; \sigma_2=3$		$\sigma_1=4; \sigma_2=3$	
	Режимы		Режимы		Режимы		Режимы	
База отсечки $b_2$ , м	1	3	1	3	1	3	1	3
$S_{\text{вх}}(\sigma_1)$ , м	10,5		10,5		38,34		10,5	
$S_{\text{вх}}(\sigma_2)$ , м	200,24		200,24		200,24		200,24	
$S_{\text{вх}}(\sigma_2)$ , м	248,49		114,83		176,27		176,27	
$S_{\text{вх}}(\sigma_2)$ , м	270,37		136,71		225,99		198,16	
$S_{\text{вх}}(\sigma_1) - S_{\text{вх}}(\sigma_2)$	-70,13		63,53		-25,75		2,08	
$C$ , с	21,64		-2,05		24,53		8,15	
$t_2(\sigma_1)$ , с	41,65	39,02	42,26	44,76	44,03	41,29	41,55	41,73
$\tau_2(\sigma_2)$ , с	54,57	57,19	30,27	27,78	48,83	51,56	41,18	41,00
$\Delta t$ , с	-12,92	-18,17	11,99	16,98	-4,80	-10,27	0,37	0,73
$\bar{V}_{\text{ур}}$ , м/с	5,43	3,86	5,30	3,74	5,36	2,51	5,62	2,85
$h'$ , м ЭН. В.	1,56	0	1,65	0,47	1,72	0,47	1,54	0,26
$h''$ , м ЭН. В.	0	2,26	0	2,4	0	2,4	0	2,4
$\delta t$ , с	4,36	1,73	4,97	7,47	9,86	7,13	4,26	4,44



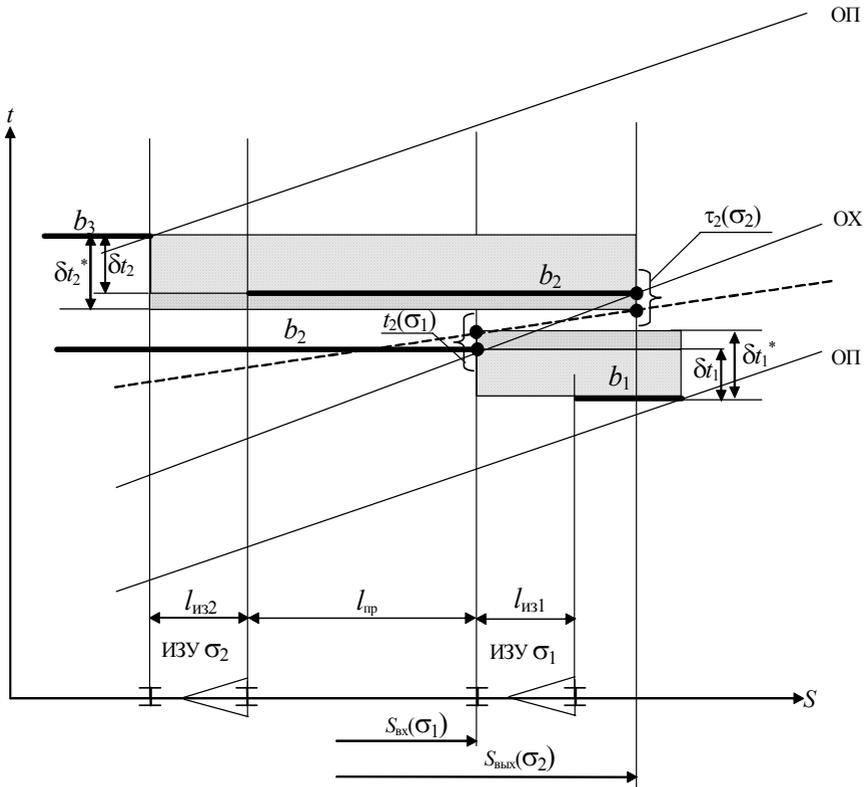
Сравнение различных режимов торможения в случае, когда  $\sigma_1 > \sigma_2$  и  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) > s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ , приведено на рис. 4.8, а, б; соответствующие результаты моделирования скатывания отцепов и расчета интервалов  $\delta t$  приведены в табл. 4.1. В данном варианте ( $\sigma_1=4$ ,  $\sigma_2=2$ ,  $\sigma_1 > \sigma_2$ ) режим 1 (максимальное торможение на ВТП), в отличие от рассмотренного ранее (см. рис. 4.6, б), обеспечивает минимальное время скатывания отцепа ОХ до той же стрелки 4 ( $s_{\text{вх}}(\sigma_1)=200,24$  м). Парадоксальный, на первый взгляд, результат объясняется тем, что в данном случае указанная точка является не началом, а концом участка разделения отцепов (см. рис. 4.8, б). Поэтому в данном случае величина  $\Delta t_{\text{ур}} > 0$  и достигает максимума  $\Delta t_{\text{ур}}=16,98$  с при 3-м режиме торможения (верхний участок границы ОДР), при котором величина интервала на стрелках разделения достигает 7,47 с (см. табл. 4.1).

Если же длина среднего отцепа больше, чем расстояние между ИЗУ стрелок разделения смежных пар отцепов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , то в этом случае  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) < s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ , несмотря на то что  $\sigma_1 > \sigma_2$ . Очевидно, что в данном случае, как видно из рис. 4.9, при выборе наилучшего режима торможения среднего отцепа следует учитывать те же закономерности, которые действуют в случае, когда  $\sigma_1 \leq \sigma_2$ .

Для примера в табл. 4.1 приведены результаты моделирования разделения группы из трех отцепов ОП-ОХ-ОП, в которой средний отцеп состоит из трех вагонов ( $b_{\text{отп2}}=38,34$  м). Как видно, в данном случае  $\sigma_1=4$ ,  $\sigma_2=3$ ,  $\sigma_1 > \sigma_2$ , однако из-за достаточно большой длины среднего отцепа  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) < s_{\text{вых}}(\sigma_2)$  и поэтому здесь, как и в первом рассмотренном случае, лучшим является 1-й режим торможения (нижний участок границы ОДР). При этом режиме достигается максимальный интервал на разделительных стрелках  $\delta t_1 = \delta t_2 = 9,86$  с.



**Рисунок 4.8** - Динамика скатывания отцепа ОХ при различных режимах регулирования интервалов  $\delta t_1$ ,  $\delta t_2$  на стрелках  $\sigma_1=4$ ,  $\sigma_2=2$ : а – графики скорости; б – графики времени. На рисунке цифрами обозначены: 1 – режим на нижнем участке границы ОДР; 2 – промежуточный режим; 3 – режим на верхнем участке границы ОДР



**Рисунок 4.9** - Схема регулирования интервалов  $\delta t_1, \delta t_2$  на разделительных стрелках при  $\sigma_1 > \sigma_2, s_{вх}(\sigma_1) < s_{вых}(\sigma_2)$

Если же в рассмотренной группе средний отцеп также из одного вагона, то при  $\sigma_1=4$  и  $\sigma_2=3$  координаты  $s_{вх}(\sigma_1)$  и  $s_{вых}(\sigma_2)$  весьма близки и длина участка разделения отцепов незначительна ( $\Delta s_{yp}=2,08$  м). В этом случае, как видно из табл. 4.1, выбор режима торможения весьма незначительно влияет на величину интервала  $\delta t$  на стрелках. Лучшим является режим 3 (верхняя граница ОДР), однако при этом максимальный интервал  $\delta t=4,44$  с незначительно превышает его минимальное значение ( $\delta t=4,26$  с), полученное при режиме 1.

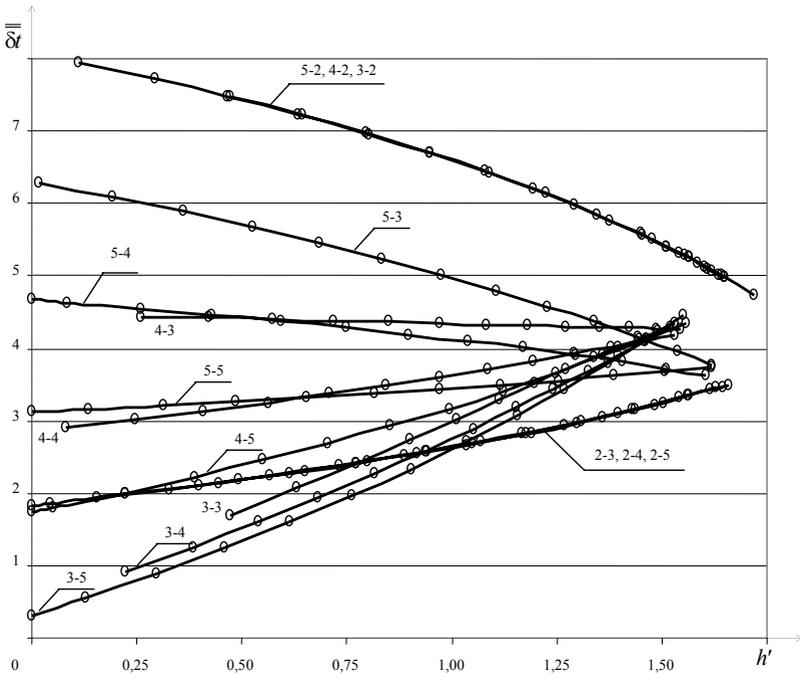
Таким образом, проведенный анализ показывает, что при выборе оптимального режима торможения отцепка необходимо учитывать соотношение

координат точек занятия  $s_{\text{вх}}(\sigma_1)$  и освобождения  $s_{\text{вых}}(\sigma_2)$  этим отцепом ИЗУ стрелок разделения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , соответственно, с предыдущим и с последующим отцепами. Такой подход является более общим, чем предложенный в [67] и основанный на анализе номеров стрелок разделения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , поскольку позволяет учесть длину тормозимого отцепа и ее влияние на выбор оптимального режима торможения. При этом если  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) > s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ , то величина интервала  $\overline{\delta t}$  возрастает с ростом  $h''$  и уменьшением  $h'$ ; если  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) < s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ , то  $\overline{\delta t}$  возрастает в противоположном направлении, т.е. с увеличением  $h'$  и уменьшением  $h''$ . Если же  $s_{\text{вх}}(\sigma_1) = s_{\text{вых}}(\sigma_2)$ , то в таком случае величина интервала остается одинаковой при любом сочетании значений  $h'$ ,  $h''$  на линии  $U(\sigma_1, \sigma_2)$ .

Общий вид зависимостей  $\overline{\delta t} = f(h')$  для всех возможных комбинаций номеров стрелок ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) показан на рис. 4.10.

Данный рисунок иллюстрирует установленную связь между разностью координат границ участка разделения отцепов  $\Delta s_{\text{yp}} = s_{\text{вх}}(\sigma_1) - s_{\text{вых}}(\sigma_2)$  и характером изменения интервала  $\overline{\delta t}$  с ростом величины  $h'$ . Действительно, во всех случаях, когда  $\Delta s_{\text{yp}} > 0$ , с ростом  $h'$  величина  $\overline{\delta t}$  уменьшается; при  $\Delta s_{\text{yp}} < 0$  линии  $\overline{\delta t} = f(h')$  имеют противоположный наклон, а при  $\sigma_1 = 4$ ,  $\sigma_2 = 3$ , когда  $\Delta s_{\text{yp}} \approx 0$ , указанная линия практически горизонтальна.

Установленный характер зависимостей  $\overline{\delta t} = f(h')$  приводит к тому, что при максимальном  $h'$  (нижний участок границы ОДР) значения интервалов  $\overline{\delta t}$  оказываются весьма близкими друг к другу (максимальная разность составляет 1,53 с). Напротив, при значениях  $h'$ , близких к 0 (верхний участок границы ОДР), отдельные значения  $\overline{\delta t}$  имеют большой разброс (максимальная разность 7,61 с).



**Рисунок 4.10** - Графики зависимости  $\overline{\delta t}(h')$  при различных комбинациях номеров стрелок  $(\sigma_1, \sigma_2)$

При этом графики зависимостей  $\overline{\delta t}=f(h')$  для отдельных комбинаций стрелок  $(\sigma_1, \sigma_2)$  существенно отличаются (см. рис. 4.10). В этой связи необходимо выполнить анализ влияния длины участка разделения  $\Delta s_{\text{рп}}$  на характер изменения интервалов  $\overline{\delta t}$  на линиях  $U(\sigma_1, \sigma_2)$ .

С этой целью были определены значения интервалов между отцепами на верхнем  $\overline{\delta t}_в$  и на нижнем  $\overline{\delta t}_н$  участках границы ОДР, а также их разность  $\gamma = \overline{\delta t}_в - \overline{\delta t}_н$  для расчетной группы ОП-ОХ-ОП при различных комбинациях номеров стрелок  $(\sigma_1, \sigma_2)$  (см. табл. 4.2).

Таблица 4.2

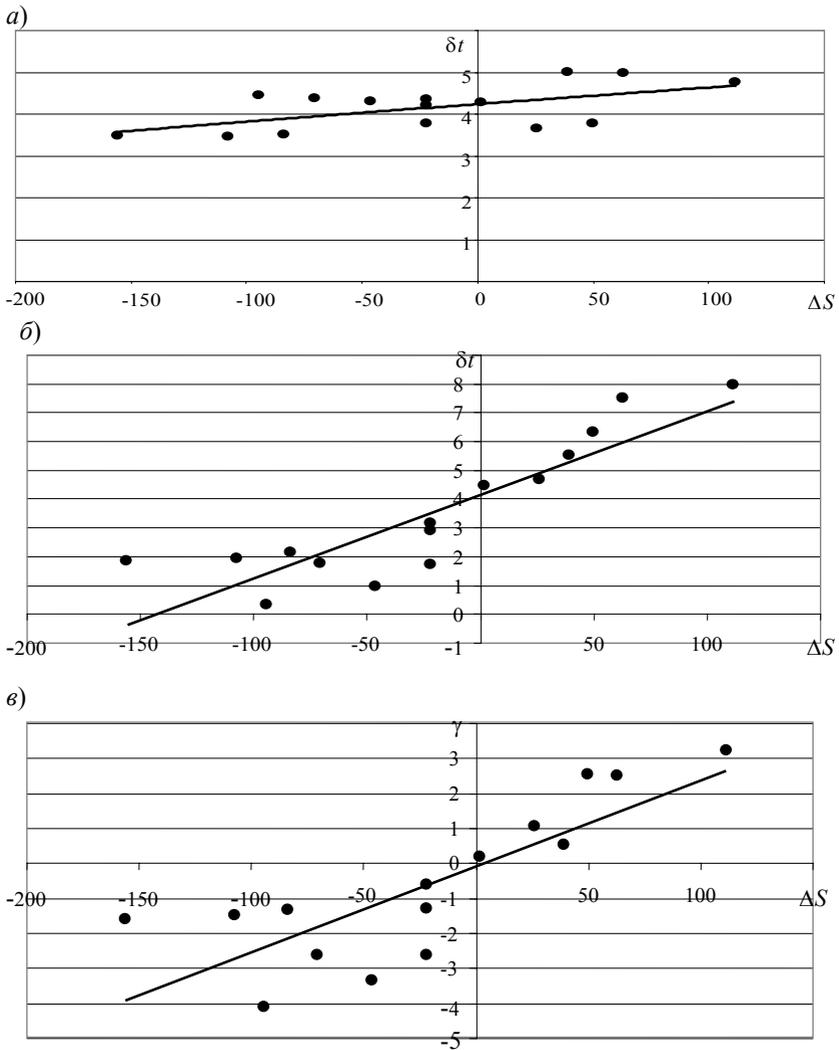
Интервалы между отцепами при режимах торможения на противоположных участках границы ОДР

$\sigma_1$	$\sigma_2$	$s_{вх}(\sigma_1)$	$s_{вых}(\sigma_2)$	$\Delta s_{ур}$	$\overline{\delta t}_в$	$\overline{\delta t}_н$	$\gamma = \overline{\delta t}_в - \overline{\delta t}_н$
1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	114,83	198,15	-83,32	2,14	3,50	-1,36
2	4	114,83	222,12	-107,29	1,93	3,45	-1,51
2	5	114,83	270,37	-155,54	1,84	3,47	-1,64
3	2	176,27	136,71	39,56	5,50	4,98	0,52
3	3	176,27	198,15	-21,88	1,69	4,34	-2,66
3	4	176,27	222,12	-45,85	0,92	4,29	-3,37
3	5	176,27	270,37	-94,10	0,32	4,44	-4,13
4	2	200,24	136,71	63,53	7,47	4,97	2,50
4	3	200,24	198,15	2,09	4,44	4,26	0,18
4	4	200,24	222,12	-21,88	2,89	4,19	-1,30
4	5	200,24	270,37	-70,13	1,73	4,36	-2,62
5	2	248,49	136,71	111,78	7,93	4,74	3,20
5	3	248,49	198,15	50,34	6,29	3,77	2,52
5	4	248,49	222,12	26,37	4,67	3,63	1,04
5	5	248,49	270,37	-21,88	3,13	3,75	-0,62

По данным табл. 4.2 было установлено наличие линейной связи между предельными значениями интервалов  $\overline{\delta t}$  на нижнем (рис. 4.11, а) и верхнем (рис. 4.11, б) участках границы ОДР и длиной участка разделения отцепов  $\Delta s_{ур}$ . В то же время рассеяние отдельных значений  $\overline{\delta t}$  вокруг линий регрессии свидетельствует о влиянии других факторов, и, в частности, положения самого участка разделения на пути скатывания отцепов.

Разность интервалов  $\gamma = \overline{\delta t}_в - \overline{\delta t}_н$  при переходе от нижнего участка границы ОДР к верхнему характеризует эффект от рационального выбора режима торможения отцепа. Оказалось, что величина  $\gamma$  также линейно зависит от расстояния между стрелками  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в расчетной группе отцепов (см. рис. 4.11, в).

Полученная зависимость показывает, что чем дальше друг от друга расположены стрелки разделения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , тем больший интервал между отцепами может быть достигнут при выборе режима торможения на соответствующем участке границы ОДР.

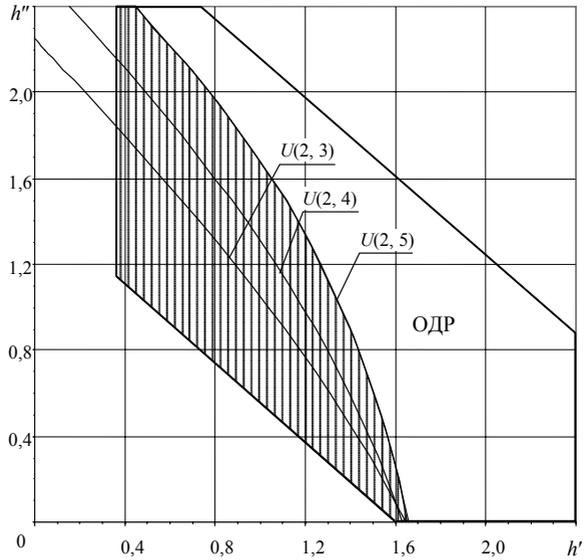


**Рисунок 4.11** - Графики зависимостей интервалов  $\delta t$  на стрелках разделения от расстояния между ними: *a* – интервалы  $\overline{\delta t}_i$  при режимах торможения на нижней границе ОДР ( $h''=0$ ); *b* – интервалы  $\overline{\delta t}_a$  при режимах торможения на верхней границе ОДР ( $h'' = \text{max}$ ); *в* – разность интервалов  $\gamma = \delta t_a - \delta t_i$

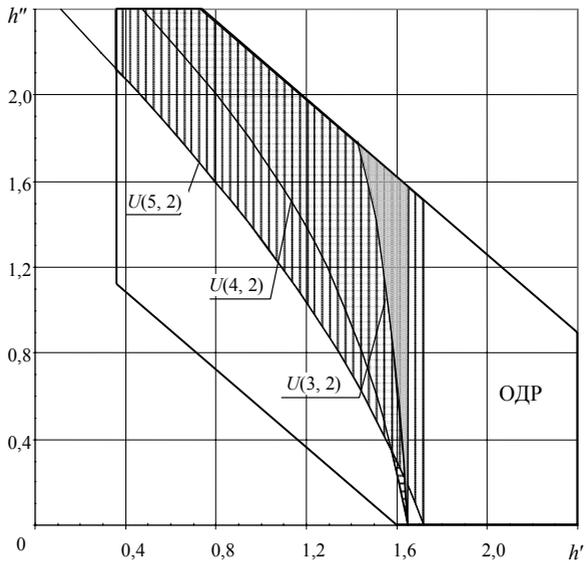
Анализ зависимостей  $\overline{\delta t} = f(h')$  позволяет сделать еще один важный вывод, касающийся тех групп отцепов, в которых одна из пар отцепов разделяется на стрелке 2 ( $\sigma_1=2$  или  $\sigma_2=2$ ). Как видно из рис. 4.10, графики  $\overline{\delta t} = f(h')$  для комбинаций номеров стрелок (2-3), (2-4) и (2-5) располагаются на одной общей линии; другую общую линию образуют указанные зависимости для комбинаций (3-2), (4-2) и (5-2). Этот эффект объясняется тем, что интервал  $\delta t$  на стрелке 2 зависит только от торможения отцепа на ВТП ( $h'$ ) и не зависит от  $h''$ . Поэтому во всех группах отцепов, где  $\sigma_1=2$  (или  $\sigma_2=2$ ) интервал  $\delta t_1$  (или  $\delta t_2$ ) определяется величиной  $h'$ , а величина  $h''$  при этом устанавливается из условия равенства интервалов  $\delta t_1 = \delta t_2$ . Множество полученных таким образом пар значений ( $h', h''$ ) образуют линию  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  равных интервалов  $\overline{\delta t}(h')$ .

Очевидно, однако, что при каждом значении существуют значения  $h''$ , не лежащие на линии  $U$ , при которых  $\delta t_2 > \delta t_1$ . Следовательно, такие режимы, исходя из требований интервального регулирования скатывания отцепов, будут более эффективны, чем находящиеся на линии равных интервалов  $\overline{\delta t}$ . Для примера на рис. 4.12, а приведены линии  $U(2, 3)$ ,  $U(2, 4)$  и  $U(2, 5)$  в ОДР отцепа ОХ. Как показывают результаты моделирования, при любом значении  $h'$  выбор величины  $h''$  в области, расположенной ниже линии  $U$ , приводит к увеличению интервала  $\delta t_2$  при неизменном значении  $\delta t_1$ ; при этом величина  $\delta t_2$  достигает максимума на нижнем участке границы ОДР. Так, например, при  $h'=0,8$  м эн. в. и  $h''=1,6$  м эн. в. достигается равенство интервалов  $\delta t_1 = \delta t_2 = 2,44$  с на стрелках  $\sigma_1=2$ ,  $\sigma_2=4$ . Если при этом значении  $h'$  уменьшить  $h''$  до 1,2 м эн. в., то  $\delta t_1$  сохранится, а  $\delta t_2$  увеличится до 4,92 с; максимум величины  $\delta t_2 = 6,67$  с достигается при  $h''=0,722$  м эн. в., находящемся на границе ОДР.

a)



б)



**Рисунок 4.12** - Области возможного увеличения интервала  $\delta t$  в одной из пар отцепов ОП-ОХ-ОП при разделении другой пары на стрелке 2:  $a - \sigma_1=2, \sigma_2>2$ ;  $b - \sigma_2=2, \sigma_1>2$

Таким образом, если  $\sigma_1=2$ , то интервалы  $\delta t_2$  существенно возрастают в области, находящейся ниже соответствующей линии  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  (заштрихована на рис. 4.12, а) и достигают максимума на нижнем участке границы ОДР.

Если же на стрелке 2 разделяется вторая пара отцепов группы ( $\sigma_2=2$ ), то в этом случае можно увеличить интервал в первой паре  $\delta t_1$ , если использовать режимы торможения, расположенные выше линии  $U(\sigma_1, \sigma_2)$  (соответствующие области заштрихованы на рис. 4.12, б). Максимальные интервалы  $\delta t_1$  при этом соответствуют режимам, находящимся на верхнем участке границы ОДР.

### 4.3. Ограничения режимов торможения по условиям интервального регулирования

Учитывая, что в качестве критерия оптимальности режимов торможения приняты затраты энергоресурсов, а также то, что в некоторых случаях требования интервального регулирования скорости отцепов противоречат требованиям прицельного регулирования, для обоснованного выбора режимов недостаточно только линии максимальных (равных) интервалов. Необходимо также установить область режимов торможения, допустимых по условиям интервального регулирования, т.е. область, в которой выполняются условия  $\delta t_1(\mathbf{h}) \geq \delta t_{\min}$ ,  $\delta t_2(\mathbf{h}) \geq \delta t_{\min}$ . С этой целью необходимо исследовать распределение величин указанных интервалов в ОВР  $\Xi$  ( $0 \leq h' \leq H'$ ,  $0 \leq h'' \leq H''$ ). В указанной области определены плоские скалярные поля интервалов  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  на стрелках его разделения, соответственно, с предыдущим и последующим отцепами, поскольку каждой точке области  $\mathbf{h} \in \Xi$  соответствуют определенные числовые значения указанных интервалов ( $\delta t_1 = f_1(h', h'')$ ,  $\delta t_2 = f_2(h', h'')$ ,  $(h', h'') \in \Xi$ ). При этом, учитывая поставленную задачу анализа условий разделения отцепов группы, целесообразно в качестве характеристики некоторого режима торможения  $(h', h'')$  использовать интервал  $\delta t$  той пары отце-

пов, для которой он является меньшим, т.е.  $\delta t(h', h'') = \min\{\delta t_1, \delta t_2\}$ . Тогда в области  $\Xi$  будет определено одно поле  $\delta t = (h', h'')$ , для анализа особенностей которого целесообразно построить линии уровня. Как известно, плоское скалярное поле можно представить линиями уровня  $\delta t(h', h'') = \text{const}$ , на которых значение  $\delta t$  остаётся постоянным.

Для примера на рис. 4.13 показано скалярное поле минимальных интервалов  $\delta t$  в расчетной группе отцепов ОП–ОХ–ОП, скатывающихся в неблагоприятных зимних условиях; при этом в обеих парах отцепов рассматривались интервалы  $\delta t$  на последних разделительных стрелках ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 5$ ).

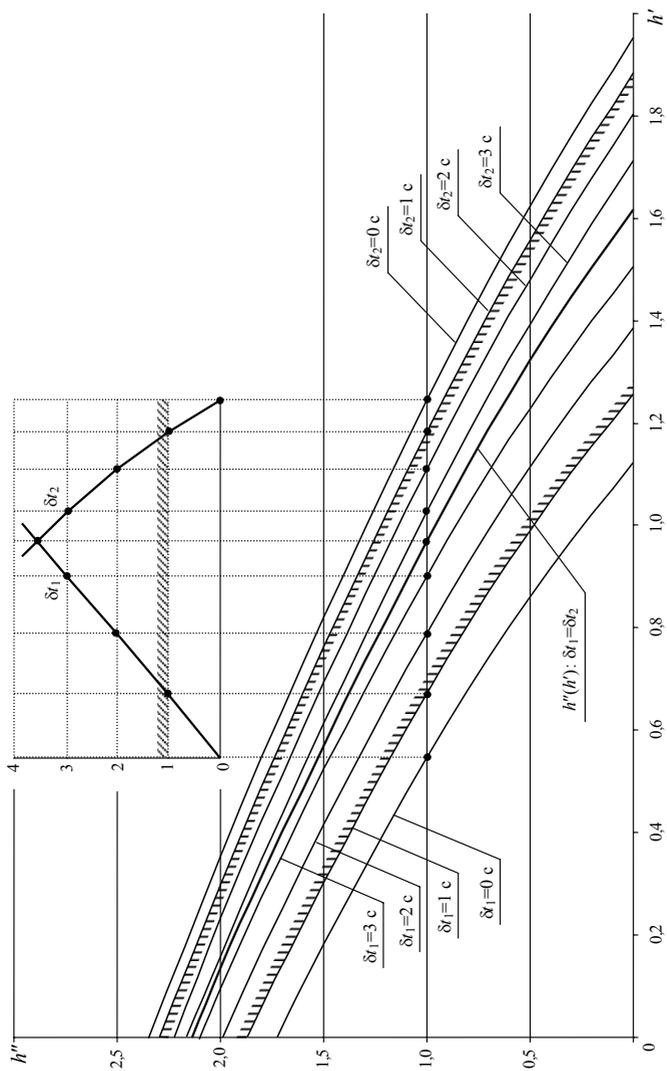
Для построения линий уровня поля интервалов предварительно было выполнено имитационное моделирование скатывания среднего отцепа ОХ при различных режимах торможения на ВТП и СТП, соответствующих узлам регулярной сетки  $h' = 0 \dots H'$ ,  $h'' = 0 \dots H''$  с шагом  $\Delta h$  в области  $\Xi$ . При каждом из режимов торможения отцепа были определены интервалы  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  на разделительной стрелке 5 (см. табл. 4.3). Полученные данные были использованы для построения статистических моделей вида  $h' = f(h'', \delta t)$  для обеих пар отцепов расчетной группы. Поиск наилучшей модели осуществлялся в классе функций, нелинейных относительно независимых переменных  $h''$ ,  $\delta t$ , но линейных относительно оцениваемых параметров модели и поэтому для их нахождения использовался множественный линейный регрессионный анализ. С этой целью при необходимости выполнялась предварительная замена переменных, которая позволяла свести нелинейные модели к линейной модели вида

$$Y_i = \theta_0 + \sum_{j=1}^m \theta_j X_{ij} + \varepsilon_i,$$

где  $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m$  – вектор оценок параметров модели;

$X_{ij}$  – преобразованная переменная  $X_{ij}(h'', \delta t)$ ;

$\varepsilon_i$  –  $i$ -е значение вектора остатков.



**Рис. 4.13.** Линии уровня скалярного поля минимальных интервалов  $\delta t_1 = \min(\delta t_1, \delta t_2)$  в группе ОП-ОХ-ОП на разделительных стрелках  $\sigma_1=5, \sigma_2=5$

Таблица 4.3  
 Интервалы  $\delta t_1$  (числитель) и  $\delta t_2$  (знаменатель) в группе ОП-ОХ-ОП на разделительных стрелках  $\sigma_1=5, \sigma_2=5$

$h'$	$h''$												
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
0	<u>13,7856</u>	<u>13,3173</u>	<u>12,8005</u>	<u>12,2259</u>	<u>11,5818</u>	<u>10,8523</u>	<u>10,0161</u>	<u>9,0437</u>	<u>-0,5661</u>	<u>0,5159</u>	<u>1,8653</u>	<u>3,6189</u>	<u>6,0405</u>
0,2	<u>12,9889</u>	<u>12,4744</u>	<u>11,9028</u>	<u>11,2625</u>	<u>10,5381</u>	<u>9,7089</u>	<u>8,7461</u>	<u>-0,2568</u>	<u>0,8114</u>	<u>2,1391</u>	<u>3,857</u>	<u>6,2128</u>	<u>9,7584</u>
0,4	<u>12,1121</u>	<u>11,5432</u>	<u>10,9065</u>	<u>10,1869</u>	<u>9,3642</u>	<u>-0,7853</u>	<u>0,091</u>	<u>1,1463</u>	<u>2,4537</u>	<u>4,5234</u>	<u>2,3101</u>	<u>-0,7239</u>	<u>-</u>
0,6	<u>11,1404</u>	<u>10,5069</u>	<u>9,7917</u>	<u>-1,1226</u>	<u>-0,3842</u>	<u>0,4842</u>	<u>1,5275</u>	<u>2,816</u>	<u>4,4685</u>	<u>6,7055</u>	<u>10,0007</u>	<u>15,6511</u>	<u>-</u>
0,8	<u>10,0551</u>	<u>9,3439</u>	<u>8,5327</u>	<u>8,975</u>	<u>8,0296</u>	<u>6,9164</u>	<u>5,5777</u>	<u>3,9228</u>	<u>1,7992</u>	<u>-1,0752</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>
1,0	<u>-0,7713</u>	<u>-0,1386</u>	<u>0,5909</u>	<u>1,4457</u>	<u>2,4678</u>	<u>3,7226</u>	<u>5,3185</u>	<u>7,4528</u>	<u>10,5357</u>	<u>15,6275</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>
1,2	<u>0,4664</u>	<u>1,1925</u>	<u>2,0418</u>	<u>3,055</u>	<u>4,2952</u>	<u>5,8663</u>	<u>7,9552</u>	<u>10,9449</u>	<u>15,7994</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>
1,4	<u>1,8977</u>	<u>2,7425</u>	<u>3,7481</u>	<u>4,9755</u>	<u>6,5243</u>	<u>8,5719</u>	<u>11,4766</u>	<u>16,1182</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>
1,6	<u>3,5805</u>	<u>4,5801</u>	<u>5,7966</u>	<u>7,3258</u>	<u>9,3365</u>	<u>12,1646</u>	<u>16,6156</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>
1,8	<u>5,6009</u>	<u>6,809</u>	<u>8,3218</u>	<u>10,3003</u>	<u>13,0604</u>	<u>17,3421</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>	<u>-</u>
2,0	<u>8,0946</u>	<u>9,5949</u>	<u>0,5468</u>	<u>14,2482</u>	<u>18,3815</u>	<u>-</u>	<u>-</u>						
2,2	<u>11,2921</u>	<u>13,2243</u>	<u>15,8777</u>	<u>19,8846</u>	<u>-</u>	<u>-</u>							
2,4	<u>15,6326</u>	<u>18,2517</u>	<u>-</u>	<u>-</u>									

Пользуясь методом регрессионного анализа для каждой из зависимостей  $h' = f_1(h'', \delta t_1)$  и  $h' = f_2(h'', \delta t_2)$  было получено 11 различных нелинейных моделей, для оценки которых и выбора наилучшей использовалась остаточная дисперсия

$$S_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - f(\theta, \mathbf{X}_i))^2.$$

Оказалось, что остаточная дисперсия  $S_{\text{ост}}^2$  минимальна для модели в виде полного полинома второй степени вида

$$h' = b_0 + b_1 h'' + b_2 \delta t + b_{12} h' \delta t + b_{11} (h'')^2 + b_{22} \delta t^2. \quad (4.8)$$

При этом для первой пары отцепов  $S_{\text{ост}1}^2 = 0,00058$ , для второй –  $S_{\text{ост}2}^2 = 0,00031$ ; коэффициенты моделей приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Коэффициенты моделей  $h' = f_1(h'', \delta t_1)$  и  $h' = f_2(h'', \delta t_2)$

Коэффициенты	I-я пара отцепов	II-я пара отцепов
$b_0$	1,1233436033	1,9532936618
$b_1$	-0,4746722779	-0,6166884035
$b_2$	0,1377114204	-0,0642666087
$b_{12}$	-0,0093046642	0,0074601789
$b_{11}$	-0,1015006054	-0,0915513176
$b_{22}$	-0,0033296228	-0,0053370052

Полученные модели (4.8) были использованы для построения линий уровня  $h'' = f_1(h')$  и  $h'' = f_2(h')$ , соответственно для I-й и II-й пар отцепов при различных постоянных значениях  $\delta t = 0, 1, 2, \dots$  с (см. рис. 4.13). Одновременно на этом же рисунке показана линия  $h'' = f(h')$ , режимы которой обеспечивают равные интервалы для обеих пар отцепов ( $\delta t_1^{(5)} = \delta t_2^{(5)} = \overline{\delta t}_{1,2}$ ). Данные для построения указанной линии были получены с помощью имитационного моделирования скатывания отцепа ОХ (см. табл. 4.5); при этом варь-

ировалось торможение на СТП ( $h'' = 0, 0,2, \dots, h''_{\max}$ ) и определялся такой режим торможения на ВТП  $h'^*$ , при котором  $\delta t_1^{(5)} = \delta t_2^{(5)}$ . Оказалось, что линия  $h'' = f(h')$  делит всю область  $\Xi$  на две части, в одной из которых (нижней)  $\delta t_1 < \delta t_2$ , а в другой –  $\delta t_1 > \delta t_2$ . Для наглядности на рис. 4.13 показано сечение поля  $\delta t(h', h'')$  при  $h'' = 1,0$  м эн. в., которое позволяет иллюстрировать характер изменения интервалов  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  в различных частях области  $\Xi$ . Полученные линии уровня позволяют также установить для расчетной группы ОП-ОХ-ОП область допустимых режимов торможения ОХ по условиям разделения отцепов группы на стрелках  $\sigma_1=5, \sigma_2=5$ . Указанная область находится между линиями  $\delta t(h', h'')=1$  с (см. рис. 4.13); очевидно что при любом режиме торможения, принадлежащем указанной области, меньший из интервалов  $\delta t_1, \delta t_2$  на стрелке 5 будет не меньше 1 с ( $\min(\delta t_1, \delta t_2) \geq 1$ ).

Таблица 4.5

Режимы торможения, обеспечивающие равенство интервалов  $\delta t_1, \delta t_2$  на стрелках  $\sigma_1=5, \sigma_2=5$

№ п/п	$h'^*$ , м эн. в.	$h''$ , м эн. в.	$\delta t$ , с
1	1,6182	0,00	3,7491
2	1,5070	0,20	3,6844
3	1,3861	0,40	3,6198
4	1,2559	0,60	3,5560
5	1,1168	0,80	3,4936
6	0,9695	1,00	3,4330
7	0,8148	1,20	3,3743
8	0,6533	1,40	3,3180
9	0,4858	1,60	3,2641
10	0,3130	1,80	3,2127
11	0,1355	2,00	3,1636
12	0,0000	2,15	3,1285

#### 4.4. Интервалы между отцепами на замедлителях тормозных позиций

Другим возможным ограничением режимов торможения по условиям интервального регулирования могут быть интервалы между отцепами на замедлителях тормозных позиций. Известно, что для раздельного торможения

отцепов необходимо, чтобы второй отцеп вошел на замедлитель после того, как он будет освобожден первым отцепом и переведен в другое положение. Другими словами, необходимо, чтобы интервал на замедлителе  $\delta t_3$  был не менее времени перевода его балок  $t_{п6}$  из одного положения в другое ( $\delta t_3 \geq t_{п6}$ ). В этой связи возникает необходимость исследования характера изменения интервалов на замедлителях при варьировании режимов торможения отцепов.

Очевидно, что в расчетной группе из 3-х отцепов может быть до четырех интервалов между ними на первых замедлителях ВТП и СТП (первая пара отцепов –  $\delta t'_1$  и  $\delta t''_1$ , вторая пара –  $\delta t'_2$  и  $\delta t''_2$ ). Фактическое число указанных интервалов зависит от взаимного расположения на плане горочной горловины разделительных стрелок и тормозных позиций. Так, для рассматриваемой горки (см. рис. 3.2), на которой первая разделительная стрелка расположена до ВТП, вторые – между ВТП и СТП, а остальные – за СТП. Поэтому на данной горке число интервалов на замедлителях для I-й пары отцепов может принимать 3 значения: 0 – если  $\sigma_i=1$ , 1 (ВТП) – если  $\sigma_i=2$  и 2 (ВТП и СТП) – если  $\sigma_i \geq 3$ . Аналогичное распределение числа интервалов имеет место и для II-й пары отцепов расчетной группы, так что их общее число может варьироваться от 0 до 4 в зависимости от комбинации номеров разделительных стрелок в группе.

Для исследований интервалов на замедлителях были использованы те же расчетные группы, что и при исследованиях интервалов на стрелках (см. п. 4.2). Расчет интервалов производился по данным имитационного моделирования скатывания среднего отцепа расчетной группы по методике, аналогичной изложенной в п. 4.2.

Следует заметить, что при фиксированных режимах торможения крайних отцепов расчетной группы на ВТП  $\delta t'_1$  интервал вообще не зависит от режима торможения среднего отцепа и имеет определенное числовое значение.

ние. Интервал  $\delta t_1''$  (первая пара отцепов на СТП) и  $\delta t_2'$  (вторая пара отцепов на ВТП) зависят только от торможения среднего отцепа на ВТП и поэтому результаты моделирования представлены совокупностью пар значений  $(h', \delta t)$ . Интервал  $\delta t_2''$  (вторая пара отцепов на СТП) определяется режимами торможения среднего отцепа как на ВТП, так и на СТП. Поэтому результаты моделирования и расчета интервала  $\delta t_2''$  представлены матрицей его значений при различных режимах торможения  $(h', h'')$  среднего отцепа.

Для анализа полученных результатов расчета интервалов на замедлителях с помощью методики, изложенной в п. 4.3, были построены модели  $\delta t_1''=f_1(h')$ ,  $\delta t_2'=f_2(h')$  и  $\delta t_2''=f_3(h', h'')$  для расчетной группы ОП-ОХ-ОП в неблагоприятных зимних условиях. Как показал статистический анализ, наилучшими для данных зависимостей являются аддитивные экспоненциальные модели вида

$$y = b_0 + b_1 e^x + b_2 e^{x^2} \quad (4.9)$$

$$y = b_0 + b_1 e^{x_1} + b_2 e^{x_2} + b_{12} e^{x_1 \cdot x_2} + b_{11} e^{x_1^2} + b_{22} e^{x_2^2} . \quad (4.10)$$

Модели вида (4.9) использовались для представления интервалов  $\delta t_1''$  и  $\delta t_2'$ ; для  $\delta t_2''$  наилучшей оказалась модель (4.10).

Коэффициенты указанных уравнений приведены в табл. 4.6. Графические изображения соответствующих зависимостей интервалов на замедлителях от величины торможения на ВТП  $h'$ , представленных указанными моделями, приведены на рис. 4.14.

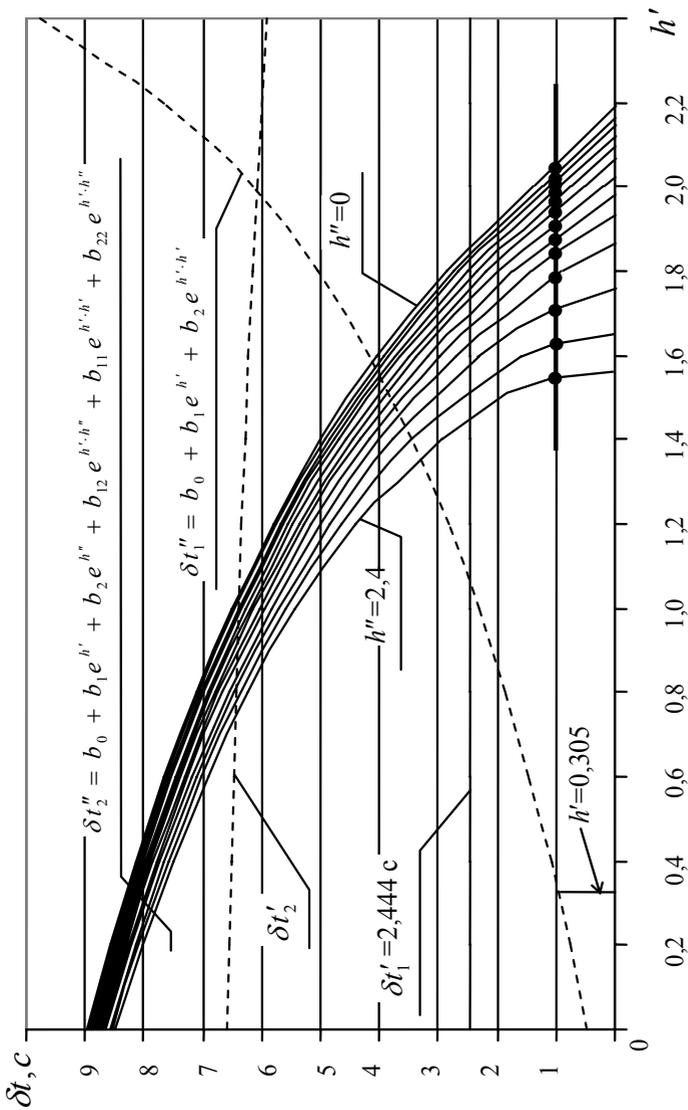
Полученные модели позволяют установить ограничения режимов торможения по условиям обеспечения минимальных интервалов  $\delta t_{\min}$  на замедлителях. Как было показано выше, интервал на ВТП в I-й паре отцепов постоянен и составляет  $\delta t_1'=2,44$  с, что допустимо по условиям разделения.

*Таблица 4.6*

Коэффициенты моделей для представления интервалов на замедлителях

Коэффициенты	ВТП, II-я пара отцепов ( $\delta t'_2$ )	СТП, I-я пара отцепов ( $\delta t''_1$ )	СТП, II-я пара отцепов ( $\delta t''_2$ )
$b_0$	6,636458994	-0,172811701	10,092204908
$b_1$	-0,083264012	0,863354059	-1,242149350
$b_2$	0,000651754	0,001156198	-0,066665054
$b_{12}$	–	–	-0,062635678
$b_{11}$	–	–	0,005235938
$b_{22}$	–	–	0,000773811
$S_{\text{ин}}^2$	0,00057000	0,011319000	0,017487940

Интервал  $\delta t$  на ВТП во II-й паре отцепов (см. рис. 4.14,  $\delta t'_2(h')$ ) существенно превышает 1 с во всей области изменения  $h'$  ( $\delta t'_2 \geq 5,91$  с) и поэтому не требует ограничения режимов торможения. В то же время интервалы на СТП могут опускаться ниже критического значения 1 с, и поэтому для них необходимо установить ограничения величин  $h'$  и  $h''$ .



**Рисунок 4.14** - Графики зависимостей интервалов на замедлителях от величины торможения на ВПП среднего отряда расчетной группы

Для нахождения предельного значения  $h'$  по условию  $\delta t_1'' \geq \delta t_{\min}$  необходимо решить задачу поиска нуля функции  $f_1(h') = \delta t_1''(h') - \delta t_{\min}$  в интервале  $[0, H']$ . Указанная задача решалась с использованием полученной модели (4.9); в результате решения установлено, что по условию разделения I-й пары отцепов на СТП величина  $h'$  должна быть ограничена снизу ( $h' = 0,305$  м эн. в.), поскольку с ростом  $h'$  величина  $\delta t_1''$  возрастает (см. рис. 4.14).

Более сложной является задача нахождения ограничения интервала на СТП для II-й пары отцепов, поскольку указанный интервал является функцией двух переменных –  $h'$  и  $h''$ . В этой связи в данном случае ограничение может быть представлено в виде функции  $h'(h'')$ . Для нахождения отдельных значений указанной функции решалась задача поиска нуля функции  $f_2(h') = \delta t_2''(h', h'') - \delta t_{\min}$  в интервале  $[0, H']$  при некотором заданном значении  $h''$ . Множество полученных таким образом пар значений  $(h'', h')$  приведено в табл. 4.7; эти данные позволили построить график искомой функции  $h'(h'')$ , определяющей ограничение интервалов на СТП во II-й паре отцепов.

Таблица 4.7

Линия ограничения режима торможения ОХ по минимальному интервалу на СТП во II-й паре отцепов

$h''$	$h'$	$h''$	$h'$
0,0000	2,0088	1,3000	1,9000
0,1000	2,0063	1,4000	1,8795
0,2000	2,0032	1,5000	1,8564
0,3000	1,9996	1,6000	1,8308
0,4000	1,9953	1,7000	1,8026
0,5000	1,9902	1,8000	1,7722
0,6000	1,9842	1,9000	1,7398
0,7000	1,9771	2,0000	1,7058
0,8000	1,9687	2,1000	1,6709
0,9000	1,9588	2,2000	1,6356
1,0000	1,9472	2,3000	1,6011
1,1000	1,9337	2,4000	1,5685
1,2000	1,9180	–	–

Окончательный вид полученной таким образом области допустимых режимов торможения среднего отцепа расчетной группы ОП-ОХ-ОП по условиям обеспечения минимальных интервалов между отцепами показан на рис. 4.15.

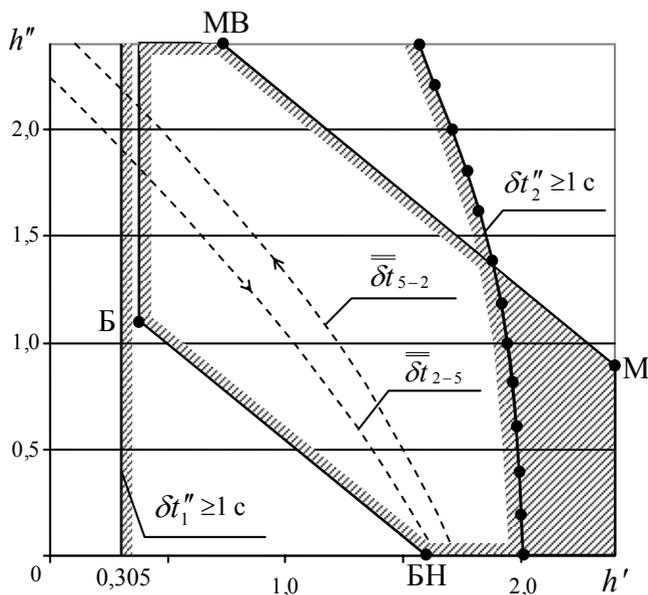
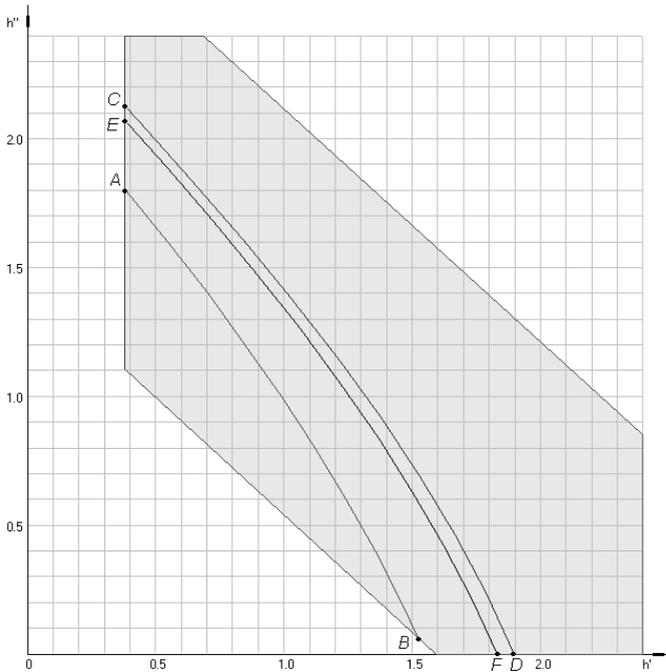


Рисунок 4.15 - ОДР по условиям интервального регулирования скорости среднего отцепа расчетной группы

#### 4.5. Исследование влияния режимов торможения крайних отцепов расчетной группы на условия разделения

Как следует из (4.1), на величину интервалов на разделительных элементах влияют не только режимы торможения среднего отцепа, но и режимы торможения смежных с ним отцепов. Для примера рассмотрим расчетную группу ОП-ОХ-ОП с разделительной стрелкой  $\sigma_1=4$  в первой паре и  $\sigma_2=5$  – во второй. На рис. 4.16 приведена ОДР среднего отцепа, на которой показаны линии равных  $\overline{\delta t}$   $AB$ ,  $CD$  и  $EF$  при различных режимах торможения крайних отцепов. Величины интервалов на разделительных стрелках в точках  $A-F$  приведены в табл. 4.8.



**Рисунок 4.16** - Изменение положения линий равных  $\overline{\delta t}$  в ОДР среднего отцепов при изменении режимов торможения крайних отцепов

Анализ результатов моделирования скатывания отцепов группы ОП-ОХ-ОП показывает, что режимы торможения крайних отцепов существенно влияют на интервалы на разделительных стрелках. Учитывая, что для этих отцепов режимы торможения могут изменяться в достаточно широких пределах, для решения задач оптимизации регулирования скорости отцепов необходимо установить причины и характер указанного влияния, а также установить роль среднего и крайних отцепов в группе при обеспечении заданных интервалов.

В табл. 4.9 приведены коэффициенты моделей (4.10) полей интервалов на разделительных стрелках первой и второй пар отцепов  $\delta t_1=f(h'_2, h''_2)$  и  $\delta t_2=f(h'_2, h''_2)$  при  $h''_1=h''_3=0$  и варьировании погашаемой энергетической высо-

ты  $h'_1, h'_3$  на ВТП для первого и третьего отцепов. Как видно, указанные модели отличаются только величиной постоянного коэффициента  $b_0$ .

Таблица 4.8

Интервалы на разделительных стрелках при изменении режимов торможения крайних отцепов

Точка	$h'_2$	$h''_2$	Режим 1: $h'_1=0; h'_3=0$		Режим 2: $h'_1=0; h'_3=0,75$		Режим 3: $h'_1=0,75; h'_3=0$	
			$\delta t_1$	$\delta t_2$	$\delta t_1$	$\delta t_2$	$\delta t_1$	$\delta t_2$
A	0,378	1,814	2,21	2,21	2,21	8,78	-2,92	2,21
B	1,533	0,057	4,29	4,29	4,29	10,87	-0,83	4,29
C	0,378	2,130	3,59	-2,99	3,60	3,60	-1,53	-2,99
D	1,898	0	6,97	0,39	6,97	6,97	1,84	0,39
E	0,378	2,075	3,29	-1,84	3,29	4,74	-1,84	-1,84
F	1,832	0	6,38	1,27	6,38	7,85	1,27	1,27

Таблица 4.9

Коэффициенты моделей полей интервалов  $\delta t_1=f(h'_2, h''_2)$  и  $\delta t_2=f(h'_2, h''_2)$

Коэффициенты	$h'_1=0; h'_3=0$		$h'_1=0; h'_3=0,75$		$h'_1=0,75; h'_3=0$	
	$\delta t_1$	$\delta t_2$	$\delta t_1$	$\delta t_2$	$\delta t_1$	$\delta t_2$
$b_0$	-3,762321	19,105890	-3,762321	25,675531	-8,889040	19,105890
$b_1$	1,392828	-1,916279	1,392828	-1,916279	1,392828	-1,916279
$b_2$	0,357833	-1,292797	0,357833	-1,292797	0,357833	-1,292797
$b_{12}$	0,827840	-2,838000	0,827840	-2,838000	0,827840	-2,838000
$b_{11}$	0,007825	-0,038744	0,007825	-0,038744	0,007825	-0,038744
$b_{22}$	0,006608	-0,027786	0,006608	-0,027786	0,006608	-0,027786

Для того, чтобы объяснить указанный факт, рассмотрим выражения (4.1). Изменение режимов торможения крайних отцепов  $\mathbf{h}_1 \rightarrow \mathbf{h}_1^*$  и  $\mathbf{h}_3 \rightarrow \mathbf{h}_3^*$  вызывает изменение времени движения, соответственно, первого отцепа  $\tau_1$  за разделительную стрелку  $\sigma_1$  на величину  $\Delta_1$  и третьего отцепа  $t_3$  до разделительной стрелки  $\sigma_2$  на величину  $\Delta_2$ :

$$\tau_1(\mathbf{h}_1^*) = \tau_1(\mathbf{h}_1) + \Delta_1, \quad t_3(\mathbf{h}_3^*) = t_3(\mathbf{h}_3) + \Delta_2. \quad (4.11)$$

Тогда в соответствии с (4.1) интервалы на разделительных стрелках будут равны

$$\delta t_1^*(\mathbf{h}_2) = t_{0,1} + t_2(\mathbf{h}_2) - \tau_1(\mathbf{h}_1^*) \quad (4.12)$$

$$\delta t_2^*(\mathbf{h}_2) = t_{0,2} + t_3(\mathbf{h}_3) - \tau_2(\mathbf{h}_2)$$

Подставляя выражения (4.11) в (4.12), получим

$$\delta t_1^*(\mathbf{h}_2) = t_{0,1} + t_2(\mathbf{h}_2) - \tau_1(\mathbf{h}_1) + \Delta_1 \quad (4.13)$$

$$\delta t_2^*(\mathbf{h}_2) = t_{0,2} + t_3(\mathbf{h}_3) + \Delta_2 - \tau_2(\mathbf{h}_2)$$

Учитывая, что

$$t_{0,1} + t_2(\mathbf{h}_2) - \tau_1(\mathbf{h}_1) = \delta t_1(\mathbf{h}_2)$$

$$t_{0,2} + t_3(\mathbf{h}_3) - \tau_2(\mathbf{h}_2) = \delta t_2(\mathbf{h}_2)$$

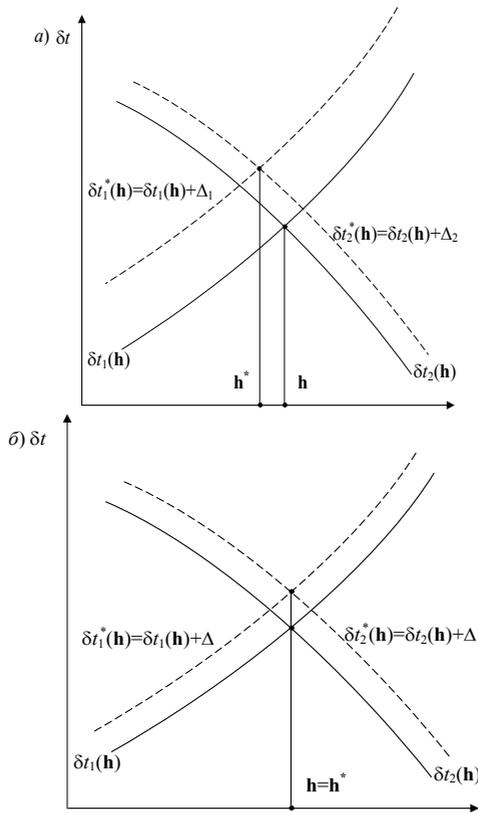
выражения (4.12) примут вид

$$\delta t_1^*(\mathbf{h}_2) = \delta t_1(\mathbf{h}_2) + \Delta_1$$

$$\delta t_2^*(\mathbf{h}_2) = \delta t_2(\mathbf{h}_2) + \Delta_2$$

Таким образом, форма полей интервалов  $\delta t_1(\mathbf{h})$  и  $\delta t_2(\mathbf{h})$  зависит только от характеристик и режимов торможения среднего отцепа. Изменение режимов торможения первого и третьего отцепов приводит к параллельному смещению всех точек соответствующих им полей  $\delta t_1(\mathbf{h})$  и  $\delta t_2(\mathbf{h})$ . Ввиду того, что для оценки условий разделения используется критерий  $\delta t(\mathbf{h}) = \min(\delta t_1(\mathbf{h}), \delta t_2(\mathbf{h}))$ , смещение полей  $\delta t_1(\mathbf{h})$  и  $\delta t_2(\mathbf{h})$  друг относительно друга приводит к изменению формы и положения линии их пересечения, а значит и к изменению поверхности  $\delta t(\mathbf{h})$  (см. рис. 4.17, а). Следствием этого является изменение положения линии равных интервалов в ОДР (см. рис. 4.16), которая является проекцией линии пересечения полей  $\delta t_1(\mathbf{h})$  и  $\delta t_2(\mathbf{h})$  на плоскость  $h'O'h''$ .

Важным частным случаем является такое изменение режимов торможения крайних отцепов, при котором не изменяется форма поверхности  $\delta t(\mathbf{h})$ ; этот случай имеет место при равенстве  $\Delta_1 = \Delta_2$ , а, следовательно, не изменяется и ее проекция на плоскость  $h'O'h''$ . При этом сохраняется положение линии равных интервалов в ОДР (см. рис. 4.17, б).



**Рисунок 4.17** - Схема смещения полей интервалов  $\delta t_1(h)$  и  $\delta t_2(h)$  при изменении режимов торможения крайних отцепов:  $a - \Delta_1 \neq \Delta_2$ ;  $b - \Delta_1 = \Delta_2$

В соответствии с (4.1) условие равенства интервалов в первой и второй парах отцепов  $\delta t_1 = \delta t_2$  при заданном режиме торможения среднего отцепа  $h_2^*$  выглядит следующим образом:

$$t_{0,1} + t_2(h_2^*, \sigma_1) - \tau_1(h_1, \sigma_1) = t_{0,2} + t_3(h_3, \sigma_2) - \tau_2(h_2^*, \sigma_2),$$

а после преобразования

$$\tau_1(h_1, \sigma_1) + t_3(h_3, \sigma_2) = t_{0,1} - t_{0,2} + t_2(h_2^*, \sigma_1) + \tau_2(h_2^*, \sigma_2).$$

Обозначим правую часть этого выражения как  $Z(h_2^*)$ :

$$Z(h_2^*) = t_{0,1} - t_{0,2} + t_2(h_2^*, \sigma_1) + \tau_2(h_2^*, \sigma_2). \quad (4.14)$$

Поскольку величина  $Z(\mathbf{h}_2^*)$  не зависит от режимов торможения крайних отцепов, то для обеспечения равенства интервалов в точке  $\mathbf{h}_2^*$  должна быть сохранена сумма:

$$\tau_1(\mathbf{h}_1, \sigma_1) + t_3(\mathbf{h}_3, \sigma_2) = Z(\mathbf{h}_2^*). \quad (4.15)$$

Таким образом, для любой точки ОДР  $\mathbf{h}_2^*$  может быть получена проекция поля  $\delta t(\mathbf{h})$  на плоскость  $h'O'h''$ , в которой линия равных интервалов проходит через данную точку  $\mathbf{h}_2^*$ . Положение проекции линии равных интервалов однозначно определяется величиной  $Z(\mathbf{h})$ .

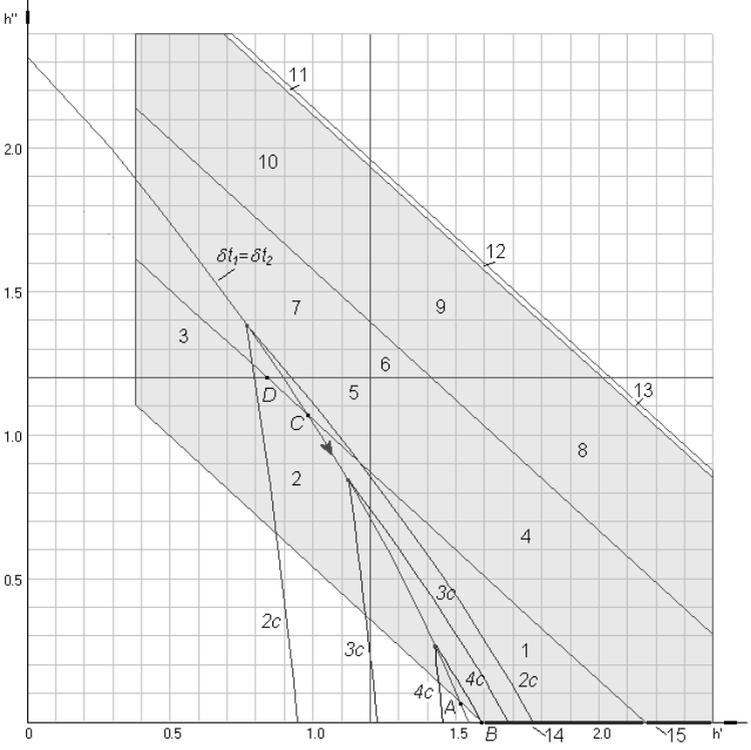
#### **4.6. Взаимосвязь интервального регулирования скорости и энергетических расходов та торможение отцепов**

В соответствии с п. 4.2 наилучшие условия разделения отцепов достигаются на верхнем или нижнем участке границы ОДР. Поэтому, если критерием оптимизации является величина минимального интервала между отцепами состава, то выбор режимов торможения должен осуществляться на одном из этих участков. При этом, выбор конкретного участка границы однозначно зависит от положения разделительных стрелок по маршруту скатывания и от длины отцепов (см. п. 4.2). В то же время анализ диаграммы распределения числа используемых замедлителей (см. рис. 3.15) показывает, что режимы торможения, соответствующие указанным участкам границы ОДР, не всегда обеспечивают минимальное число включений тормозных замедлителей. Так, в случае показанном на рис. 4.18 максимум интервалов  $\delta t_1$ ,  $\delta t_2$  достигается в точке  $A$  ( $\delta t_1(A) = \delta t_2(A) = 4,33$  с). Для того, чтобы реализовать соответствующий режим, необходимо включение трех замедлителей на спускной части горки (2 на ВТП и 1 на СТП) и трех замедлителей на ПТП. В то же время, режим торможения, соответствующий точке  $B$  (узловая точка ОДР), требует включения двух замедлителей на спускной части горки и трех замедлителей на ПТП; при этом  $\min(\delta t_1(B), \delta t_2(B)) = 3,98$  с. При минимальном числе

включений (два замедлителя на спускной части и два замедлителя на ПТП) максимальный интервал достигается в точке  $C$  ( $\delta t_1(C)=\delta t_2(C)=2,58$  с).

Таким образом, из приведенного примера видно, что существует определенная связь между числом замедлителей, используемых для торможения отцепов, и интервалами между отцепами на разделительных стрелках.

В этой связи, для решения задачи минимизации расходов энергии на управление роспуском составов необходимо установить взаимосвязь между энергетическими расходами  $E_{отп}$ , связанными с включением замедлителей при торможении отцепа, и максимальными интервалами на разделительных элементах, которые могут быть достигнуты в результате.



**Рисунок 4.18** - Положение линий уровня поля интервалов  $\delta t=f(h'_2, h''_2)$  на диаграмме использования замедлителей

Учитывая, что режимы торможения с равным числом используемых замедлителей образуют в ОДР  $\Omega$  непересекающиеся области  $\omega_i$ , необходимо формализовать процедуру направленного перебора этих областей для поиска оптимального режима торможения.

Так как  $\omega_i$  являются подмножествами  $\Omega$ , то в них сохраняются все закономерности изменения интервалов, присущие ОДР в целом (см. п. 4.2). Поэтому в случае, когда линия равных интервалов проходит через некоторую область  $\omega_i$ , максимальное значение интервала в этой области достигается на ее границе. Выбор участка границы  $\omega_i$  выполняется по тем же правилам, что и для всей  $\Omega$ . Так, например, в области  $\omega_5$  (см. рис. 4.18) максимальный интервал  $\delta t$  достигается при реализации режима, соответствующего точке  $C$  ( $\delta t_1(C)=\delta t_2(C)=2,58$  с).

В результате имитационных экспериментов установлено, что в случае, когда линия равных интервалов не пересекает область  $\omega_i$  наилучшие условия разделения достигаются в одной из ее вершин. При этом интервалы  $\delta t_1$ ,  $\delta t_2$  в данной точке будут различными: если вершина  $\omega_i$  находится слева от линии равных интервалов, то  $\delta t_1 < \delta t_2$ ; в противном случае  $\delta t_1 > \delta t_2$ . Так, в области  $\omega_3$  (см. рис. 4.18) максимальный интервал  $\delta t$  достигается при реализации режима, соответствующего ее вершине в точке  $D$  ( $\delta t_1(D)=2,13$  с,  $\delta t_2(D)=3,03$  с).

В случае, если линия равных интервалов пересекает несколько областей  $\omega_i$  с допустимым расходом энергии  $E_{\text{отц}} \leq \bar{E}_{\text{отц}}$ , то необходимо выбрать крайнюю область в направлении роста интервалов вдоль этой линии. Так, если области  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_5$ ,  $\omega_7$  являются допустимыми, то наилучший режим торможения соответствует точке  $A$  области  $\omega_1$  (см. рис. 4.18).

В результате можно сделать вывод о том, что при заданной величине энергетических расходов  $E_{\text{отц}}(\mathbf{h}) \leq \bar{E}_{\text{отц}}$  и фиксированном положении линии

равных интервалов в ОДР задача максимизации минимального интервала на разделительных элементах имеет единственное решение.

Следует учесть, что в процессе оптимизации режима торможения некоторого отцепа в составе режимы торможения смежных отцепов, как правило, неизвестны. По этой причине невозможно установить положение линии равных интервалов  $\delta t$  для указанного среднего отцепа. В то же время в соответствии с п. 4.5 положение данной линии однозначно определяется параметром  $Z$  (4.14). Тогда, как было показано выше, для любой линии с определенным значением параметра  $Z$  существует оптимальный режим торможения  $\mathbf{h}^*(Z)$ , который обеспечивает максимальное значение меньшего из двух интервалов  $\delta t$  в группе из трех смежных отцепов. Множество режимов  $\mathbf{h}^*(Z) \in \Omega$ ,  $Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}$  образуют область эффективных режимов  $\Omega_{\text{э}}$ . Здесь  $Z_{\min}$ ,  $Z_{\max}$  – предельные значения параметра  $Z$ , определенные по (4.15) соответственно при быстром и медленном режимах скатывания крайних отцепов расчетной группы.

Учитывая, что поиск оптимальных режимов торможения отцепов состава выполняется итерационным методом (см. разд. 5), то ограничение ОДР  $\Omega$  до области  $\Omega_{\text{э}} \in \Omega$  позволит существенно упростить поиск оптимальных режимов в каждой расчетной группе отцепов, а следовательно и продолжительность решения всей задачи.

Для выделения области эффективных режимов торможения  $E$  при заданной величине энергетических расходов предлагается следующая методика. Так как эффективные режимы находятся только на границах областей  $\omega_j$ , то диаграмма используемых замедлителей в ОДР (см. рис. 3.15) может быть представлена плоским ориентированным графом  $G=(V, D)$  (см. рис. 4.19). Вершинами графа  $v \in V$  являются вершины областей  $\omega_j$ , а дугами  $d \in D$  – соединяющие их отрезки.

На первом этапе формируется множество вершин  $V$ , в котором каждая из них  $v_j \in V$  представлена структурой:

$$v_i = (\mathbf{h}, Z),$$

и множество дуг  $d_j \in D$

$$d_j = (v, u, E_{\text{отц}}, h_{\text{сп}}),$$

где  $\mathbf{h}$  – режим торможения в данной вершине;

$Z$  – параметр (4.14), идентифицирующий линию равных интервалов на разделительных стрелках при режиме  $\mathbf{h}$ ;

$v, u$  – соответственно, начальная и конечная вершины дуги  $d$ , при этом ориентация дуг выбирается таким образом, чтобы  $Z_v < Z_u$ ;

$E_{\text{отц}}$  – энергетические расходы на включение замедлителей, которые соответствуют режимам дуги  $d$ ;

$h_{\text{сп}}$  – параметр, характеризующий положение дуги в ОДР.

$$h_{\text{сп}} = \frac{h''(v_n) + h''(v_k)}{2}.$$

В табл. 4.10, 4.11 приведены списки, соответственно, вершин и дуг графа  $G$ , представленного на рис. 4.19. Список дуг графа  $G$  используется для построения диаграммы эффективных режимов торможения среднего отцепа в каждой из областей  $\omega_i$ .

Таблица 4.10

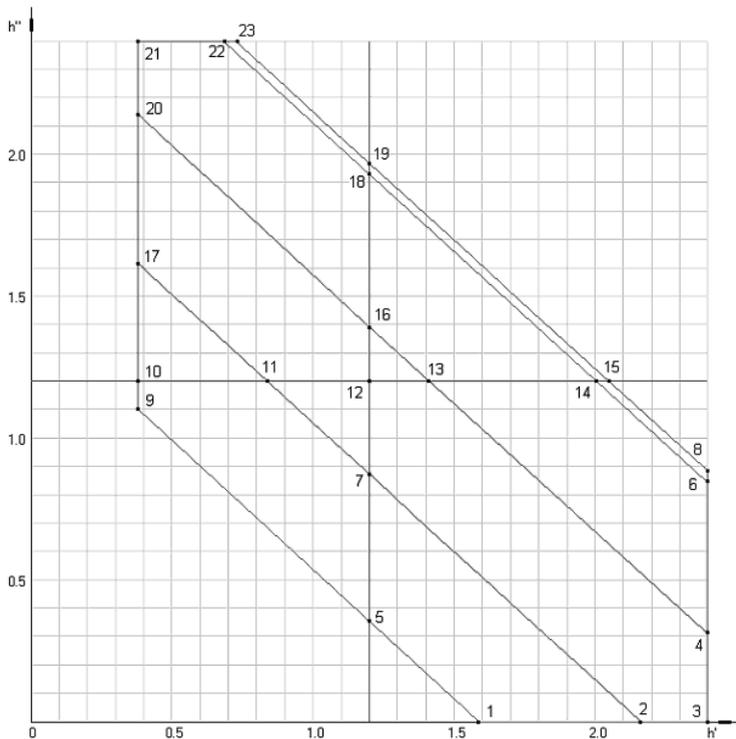
Список вершин графа  $G$

№ точки	$h'$	$h''$	$Z(\mathbf{h})$	№ точки	$h'$	$h''$	$Z(\mathbf{h})$
1	1,589	0	93,473	13	1,414	1,200	106,883
2	2,162	0	106,742	14	2,006	1,200	176,352
3	2,400	0	116,118	15	2,047	1,200	226,213
4	2,400	0,309	123,652	16	1,200	1,394	105,017
5	1,200	0,353	90,171	17	0,378	1,618	90,284
6	2,400	0,845	188,356	18	1,200	1,929	164,147
7	1,200	0,871	95,125	19	1,200	1,969	206,840
8	2,400	0,894	250,547	20	0,378	2,140	99,845
9	0,378	1,100	85,509	21	0,378	2,400	110,643
10	0,378	1,200	86,255	22	0,682	2,400	159,554
11	0,838	1,200	92,701	23	0,730	2,400	208,566
12	1,200	1,200	100,310	-	-	-	-

Таблица 4.11

Список дуг графа  $G$ 

Дуга	$u$	$v$	Число включений			$E_{отц}$	$h_{ср}$	Дуга	$u$	$v$	Число включений			$E_{отц}$	$h_{ср}$
			ВТП	СТП	ПТП						ВТП	СТП	ПТП		
1	1	2	2	0	3	0,298	0	19	17	11	1	2	2	0,405	1,409
2	5	1	2	1	3	0,422	0,176	20	12	13	2	1	2	0,405	1,200
3	2	3	2	0	2	0,281	0	21	12	16	1	2	2	0,405	1,297
4	7	2	2	1	2	0,405	0,435	22	13	14	2	1	1	0,388	1,200
5	3	4	2	1	2	0,405	0,154	23	16	13	2	2	1	0,512	1,297
6	4	6	2	1	1	0,388	0,577	24	14	15	2	1	0	0,371	1,200
7	13	4	2	1	1	0,388	0,754	25	18	14	2	2	0	0,495	1,564
8	5	7	1	1	3	0,298	0,612	26	19	15	2	2	0	0,495	1,584
9	9	5	1	1	3	0,298	0,726	27	20	16	1	2	1	0,388	1,767
10	6	8	2	1	0	0,371	0,869	28	16	18	1	2	1	0,388	1,661
11	14	6	2	1	0	0,371	1,022	29	17	20	1	2	2	0,405	1,879
12	11	7	1	1	2	0,281	1,035	30	18	19	1	2	0	0,371	1,949
13	7	12	1	1	2	0,281	1,035	31	22	18	1	2	0	0,371	2,164
14	15	8	2	1	0	0,371	1,047	32	19	23	1	2	0	0,371	2,184
15	9	10	1	1	3	0,298	1,150	33	20	21	1	2	1	0,388	2,270
16	10	11	1	1	3	0,298	1,200	34	21	22	1	2	1	0,388	2,400
17	10	17	1	2	3	0,422	1,409	35	22	23	1	2	0	0,371	2,400
18	11	12	1	1	2	0,281	1,200	-	-	-	-	-	-	-	-



**Рисунок 4.19** - Граф используемых замедлителей в ОДР отцепа ОХ

Пример диаграммы эффективных режимов представлен на рис 4.20. Указанная диаграмма используется для выделения области эффективных режимов  $\Omega_3$  во всей ОДР  $\Omega$ .

На первом шаге формирования области  $\Omega_3$  из графа исключаются дуги для которых  $E_{отц} > 0,371$  кВт·ч; указанные дуги показаны на рис. 4.20 пунктиром. Список дуг, допустимых по ограничению энергетических расходов ( $E_{отц} \leq 0,371$  кВт·ч) приведен в табл. 4.12.

На втором шаге выполняется анализ дуг графа  $G$  и для каждого значения  $Z$  осуществляется поиск режима с наименьшим ( $s_{вх}(\sigma_1) \leq s_{вых}(\sigma_2)$ ), или наибольшим ( $s_{вх}(\sigma_1) > s_{вых}(\sigma_2)$ ) значением параметра  $h_{ср}$ ; остальные режимы исключаются из множества  $E$ .

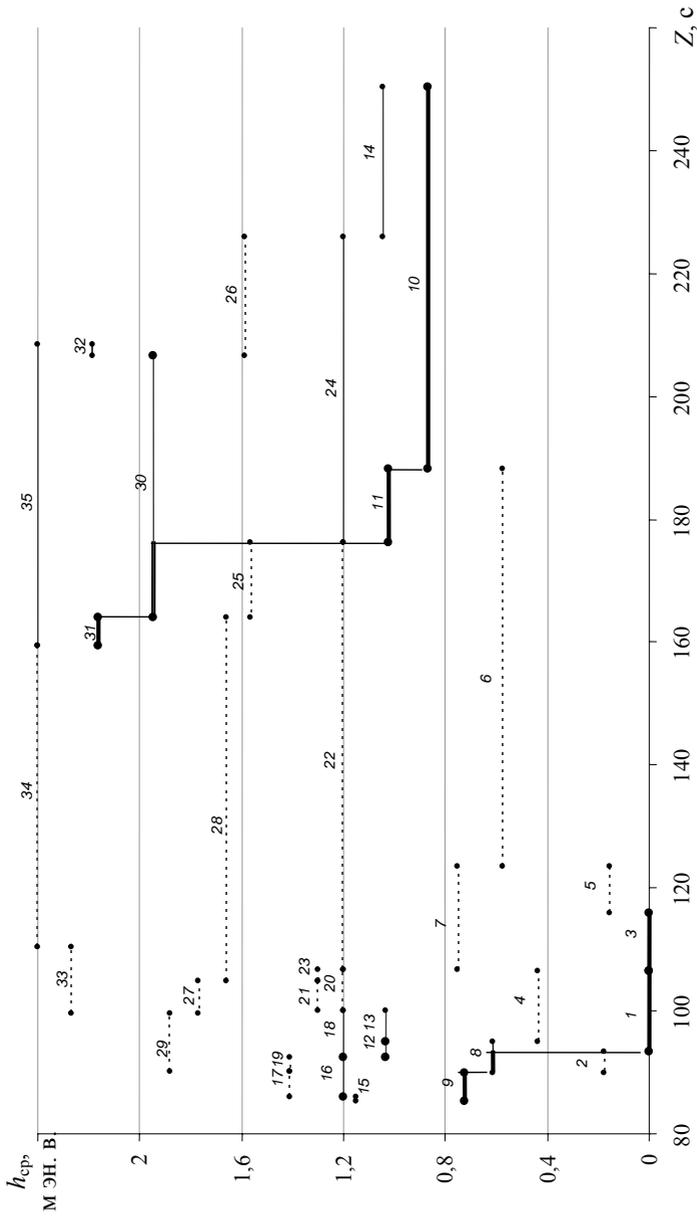
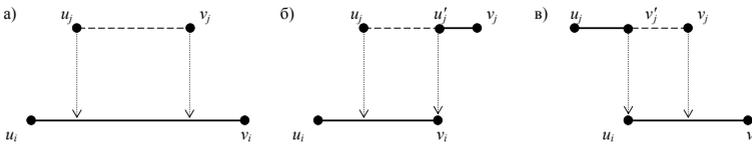


Рисунок 4.20 - Диаграмма эффективных режимов торможения отцела ОХ

Список дуг графа  $G$  при  $E_{\text{отн}} \leq 0,371$  кВт·ч

Дуга	$E_{\text{отн}}$	$h_{\text{сп}}$	Дуга	$E_{\text{отн}}$	$h_{\text{сп}}$
1	0,298	0	15	0,298	1,150
3	0,281	0	16	0,298	1,200
8	0,298	0,612	18	0,281	1,200
9	0,298	0,726	22	0,388	1,200
10	0,371	0,869	24	0,371	1,200
11	0,371	1,022	30	0,371	1,949
12	0,281	1,035	31	0,371	2,164
13	0,281	1,035	32	0,371	2,184
14	0,371	1,047	35	0,371	2,400

Порядок операции исключения неэффективных режимов приведен на рис. 4.21. В результате селекции множество режимов включает эффективные (указаны на рис. 4.20 жирными линиями) и неэффективные режимы (указаны на рис. 4.20 тонкими сплошными линиями). Список эффективных дуг графа  $G$  приведен в табл. 4.13.



**Рисунок 4.21** - Селекция эффективных режимов торможения:  $a$  – исключение всей дуги  $u_j \rightarrow v_j$ ;  $b$  – исключение участка дуги  $u_j \rightarrow u'_j$ ;  $в$  – исключение участка дуги  $v'_j \rightarrow v_j$

На третьем шаге осуществляется окончательное согласование режимов торможения в смежных вершинах выбранных дуг графа  $G$ . Выбор осуществляется в соответствии со следующими условиями: если при некотором значении  $Z$  выполняется условие

$$\min(\delta t_1(A), \delta t_2(A)) > \min(\delta t_1(B), \delta t_2(B)) \text{ или}$$

$$\min(\delta t_1(A), \delta t_2(A)) = \min(\delta t_1(B), \delta t_2(B)) \text{ и } \max(\delta t_1(A), \delta t_2(A)) > \max(\delta t_1(B), \delta t_2(B)),$$

то режим  $A$  предпочтительнее режима  $B$ , иначе режим  $B$  предпочтительнее режима  $A$ . С этой целью в пределах конечных точек осуществляется поиск такого положения линии равных интервалов, при котором  $\delta t_{1п} = \delta t_{2п}$  (см. рис. 4.22). Указанному интервалу в соответствие ставится вершина ОДР.

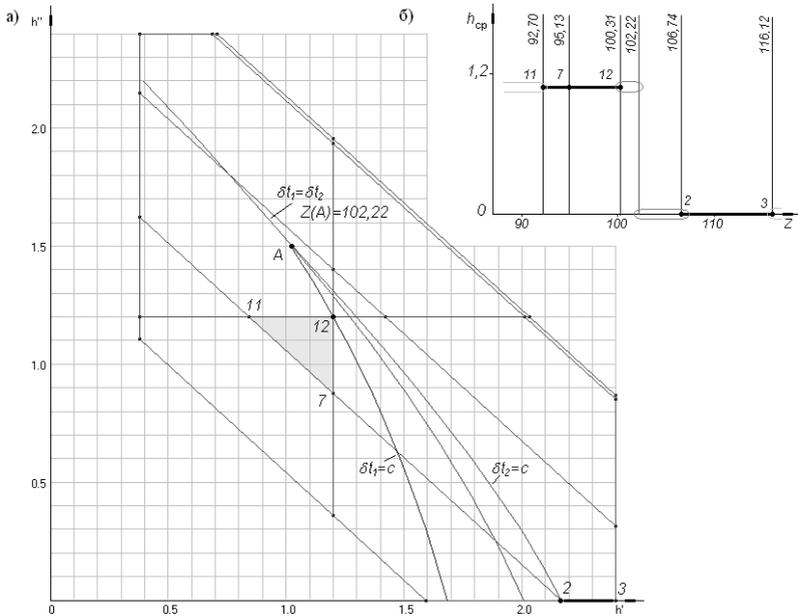
Эффективные дуги графа  $G$  при  $E_{\text{отц}} \leq 0,371$  кВт·ч

Дуга	$V$	$H_{\text{ср}}$	$Z_u$	$Z_v$
1	0,298	0	93,473	106,742
3	0,281	0	106,742	116,118
8	0,298	0,612	90,171	93,473
9	0,298	0,726	85,509	90,171
10	0,371	0,869	188,356	250,547
11	0,371	1,022	176,352	188,356
30	0,371	1,949	164,147	176,352
31	0,371	2,164	159,554	164,147

В окончательном виде область эффективных режимов торможения  $\Omega_3$  при  $E_{\text{отц}} \leq 0,371$  кВт·ч представлена в табл. 4.14.

Учитывая, что количество включений замедлителей для торможении отцепа, а значит и связанные с ними энергетические расходы  $E_{\text{отц}}$ , изменяется дискретно (см. табл. 3.9), то для отцепа могут быть перечислены все возможные значения  $E_{\text{отц}}$  и построены соответствующие им области эффективных режимов торможения  $\Omega_3(E_{\text{отц}})$ . Среди указанных областей могут быть выделены области с минимальными  $\Omega_3(\underline{E}_{\text{отц}})$  и максимальными  $\Omega_3(\overline{E}_{\text{отц}})$  энергетическими расходами на торможение. Значение  $\underline{E}_{\text{отц}}$  определяется минимальным числом включений замедлителей, необходимым для обеспечения условий прицельного регулирования. Значение  $\overline{E}_{\text{отц}}$  определяется максимальным числом включений замедлителей, при которых могут быть достигнуты максимальные интервалы на разделительных элементах. При этом, в зависимости от положения разделительных элементов,  $\Omega_3(\overline{E}_{\text{отц}})$  соответствует верхнему или нижнему участку границы ОДР.

Таким образом, выполненные исследования позволяют производить предварительный анализ характеристик и условий скатывания отцепа и выделять области эффективных режимов торможения для заданной величины энергетических расходов, что позволит в последующем существенно упростить процедуру поиска оптимального управления роспуском состава.



**Рисунок 4.22** - Выбор эффективных режимов в узловых точках ОДР:  
*а* – положение линий уровня интервалов на диаграмме распределения числа используемых замедлителей; *б* – согласование режимов в узловых точках диаграммы эффективных режимов торможения

Таблица 4.14

Область эффективных режимов торможения при  $E_{отт} \leq 0,371$  кВт·ч

$Z_u$	$Z_v$	$u$		$v$	
		$h'$	$h''$	$h'$	$h''$
<85,509	85,509	0,378	1,100	0,378	1,100
85,509	90,171	0,378	1,100	1,200	0,353
90,171	92,327	1,200	0,353	1,200	0,612
92,327	93,473	1,589	0,000	1,589	0,000
93,473	106,742	1,589	0,000	2,162	0
106,742	116,118	2,162	0	2,400	0
116,118	159,554	2,400	0	2,400	0
159,554	164,147	0,682	2,400	1,200	1,929
164,147	172,570	1,200	1,929	1,200	1,942
172,570	176,352	2,006	1,200	2,006	1,200
176,352	188,356	2,006	1,200	2,400	0,845
188,356	250,547	2,400	0,845	2,400	0,894
250,547	>250,547	2,400	0,894	2,400	0,894

## ГЛАВА 5

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ ПРИ РОСПУСКЕ СОСТАВОВ НА ГОРКАХ

#### 5.1. Постановка задачи оптимизации

В современных условиях эксплуатации сортировочных горок, характеризующихся снижением объемов переработки вагонов, главной целью оптимизации режимов торможения скатывающихся отцепов становится не повышение скорости роспуска, а минимизация энергетических расходов на торможение, а также обеспечение их надежного разделения на стрелках и докатывания до стоящих вагонов с безопасной скоростью. Достижение последней цели позволит минимизировать объем маневровой работы по ликвидации последствий неразделений отцепов и окон на сортировочных путях и за счет этого также сократить затраты энергоресурсов на сортировочный процесс.

Таким образом, при оптимизации режимов торможения необходимо минимизировать расходы энергии на включение замедлителей, а также максимизировать интервалы между отцепами на разделительных элементах (стрелках, замедлителях ТП). Следовательно, задача поиска оптимальных режимов торможения является двухкритериальной. Первым критерием является суммарный расход энергии  $\Sigma E_{\text{отц}}$  при включении замедлителей для торможения отцепов состава, а вторым – минимальный интервал между скатывающимися отцепами на разделительных элементах  $\delta t^*$ . Между указанными критериями существует отношение строгого предпочтения  $\Sigma E_{\text{отц}} \ll \delta t^*$ .

Как показал анализ, решение задачи оптимизации режимов торможения отцепов состава в такой постановке может быть получено за несколько этапов. На предварительном этапе производится поиск таких режимов торможения, которые обеспечивают максимум минимального интервала  $\delta t^*$  между отцепами состава. При этом выбор режимов торможения для каждого отцепа осуществляется на границе ОДР этого отцепа, т.е. без ограничения

энергетических расходов ( $\mathbf{h} \in \Omega_{\varepsilon}(\overline{E}_{отц})$ ), см. п. 4.6). В случае, если полученный в результате поиска интервал  $\delta t^*$  удовлетворяет условию  $\delta t^* > \delta t_{\min}$ , то осуществляется переход к следующему этапу с целью минимизации расходов энергии на торможение вагонов; в противном случае, очевидно, что при заданной скорости роспуска задача не имеет решения и поэтому необходимо ее снижение.

На последующих этапах процесс максимизации минимального интервала  $\delta t^*$  повторяется. При этом на  $j$ -м этапе выбор режима торможения некоторого отцепа осуществляется в соответствующей этому этапу области эффективных режимов данного отцепа  $\Omega_{\varepsilon_j}(E_{отц_j})$ , в которой расход энергии замедлителями не превышает величины  $E_{отц_j}$ . Если при данных режимах торможения будет получено решение, при котором выполняется условие  $\delta t^* \geq \delta t_{\min}$ , то это решение является оптимальным. В противном случае необходимо для первого отцепа пары с интервалом  $\delta t^* < \delta t_{\min}$ , установить очередную область  $\Omega_{\varepsilon_{(j+1)}}$ , в которой расход энергии замедлителями выше, чем в предыдущей ( $E_{отц_{(j+1)}} > E_{отц_j}$ ), и повторить решение на следующем  $(j+1)$ -м этапе.

Как было указано выше, выбор режимов торможения отцепов состава на очередном этапе осуществляется таким образом, чтобы максимизировать минимальный интервал  $\delta t^*$  между ними. Известно, что условия разделения пары отцепов  $(i, i+1)$  на стрелке  $\sigma_i$  характеризуются величиной интервала  $\delta t_i$  между моментами освобождения изолированного участка стрелки  $i$ -м и занятия его  $(i+1)$ -м отцепами, в течение которого этот участок остается свободным

$$\delta t_i(q_i, q_{i+1}, \sigma_i) = t_{0i} + t_{i+1}(q_{i+1}, \sigma_i) - \tau_i(q_i, \sigma_i) \quad (5.1)$$

где  $q_i, q_{i+1}$  – параметры, характеризующие режимы торможения, соответственно,  $i$ -го и  $(i+1)$ -го отцепов;

$t_{0i}$  – начальный интервал между отцепами на вершине горки;

$\tau_i$  – время движения  $i$ -го отцепа от момента отрыва до момента освобождения изолированного участка разделительной стрелки  $\sigma_i$ ;

$t_{i+1}$  – время движения  $(i+1)$ -го отцепа от момента отрыва до момента занятия изолированного участка разделительной стрелки  $\sigma_i$ .

Очевидно, что наилучшие условия разделения скатывающихся отцепов на стрелках обеспечиваются при максимальных интервалах  $\delta t_i$  между ними.

Режимы торможения отцепов, изменение которых позволяет регулировать интервалы  $\delta t_i$ , могут быть представлены парами значений энергетической высоты  $(h', h'')$ , погашаемой, соответственно, на первой и второй тормозных позициях спускной части горки. Следует заметить, что любая точка области эффективных режимов  $\Omega_3$ , а, следовательно, и соответствующий ей режим торможения отцепа могут быть однозначно определены параметром  $q \in [q_{\min}, q_{\max}]$ , который принимает целочисленные значения  $(0, 1, 2, \dots)$  в узлах области; при этом значение  $q_{\min}=0$  соответствует минимальному значению параметра  $Z$  (см. п. 4.6), а  $q_{\max}$  – максимальному значению  $Z_{\max}$ . Указанный параметр используется для представления отрезков области  $\Omega_3$  в параметрическом виде [67]:

$$\left. \begin{aligned} h' &= b_{1j} + k_{1j}q \\ h'' &= b_{2j} + k_{2j}q \end{aligned} \right\}, \quad j=1, \dots, n, \quad (5.2)$$

где  $b, k$  – коэффициенты;

$n$  – число отрезков области  $\Omega_3$ .

Оптимальными являются такие режимы торможения отцепов состава  $q_i$ , при которых интервалы  $\delta t_i$  (5.1) достигают максимума, обеспечивая тем самым максимальную надежность разделения отцепов на стрелках. Поэтому целевая функция в задаче оптимизации режимов торможения представляет собой вектор из  $(n-1)$  компонентов:

$$\delta T(\mathbf{q}) = (\delta t_1(q_1, q_2), \delta t_2(q_2, q_3), \dots, \delta t_{n-1}(q_{n-1}, q_n)). \quad (5.3)$$

При этом желательно установить такие значения режимов  $\mathbf{q}$  в допустимой области  $(\mathbf{q} \in \mathbf{Q})$ , при которых все интервалы  $\delta t_i$  достигают максимума.

Очевидно, однако, что получить такое решение невозможно, поскольку увеличение некоторого интервала  $\delta t_i$  приведет к соответствующему уменьшению интервала  $\delta t_{i+1}$  в следующей паре отцепов. Поэтому обычно осуществляют поиск компромиссного решения, при котором максимизируется минимальный интервал  $\delta t_i$  в составе [55-59]:

$$\delta T^*(\mathbf{q}) = \max_{q \in Q} \min (\delta t_1(q_1, q_2), \delta t_2(q_2, q_3), \dots, \delta t_{n-1}(q_{n-1}, q_n)), \delta t_i \geq \delta t_{\min}. \quad (5.4)$$

Такой критерий оптимизации позволяет обеспечить при роспуске максимальную надежность разделения отцепов состава на разделительных стрелках.

## **5.2. Итерационный метод оптимизации режимов торможения отцепов состава**

Как показано в п. 1.3 решение поставленной задачи с использованием традиционных методов оптимизации не является наилучшим, поскольку часть найденных при этом интервалов оказывается равной минимальному интервалу  $\delta T^*$ , тогда как их можно увеличить за счет некоторого уменьшения других интервалов большей величины в смежных парах отцепов [59]. Для устранения указанного недостатка необходимо в соответствии с принципами системного подхода рассматривать расформируемый состав как систему взаимосвязанных отцепов. Режимы торможения отдельных отцепов должны обеспечивать максимально возможные интервалы на стрелках для всех неблагоприятных по условиям разделения пар отцепов за счет оптимального их распределения по всему составу.

Отцепы состава существенно различаются по параметрам – длине, весу, сопротивлению, дальности пробегу в парк и др. Случайное размещение в составе отцепов с различными параметрами приводит к образованию групп отцепов, отличающихся условиями разделения на стрелках. В благоприятных группах (как правило, это группы длинных отцепов) на вершине горки между отцепами образуются достаточно большие интервалы, которые сохраняются

до разделительных элементов и обеспечивают надежное разделение таких отцепов. Напротив, в неблагоприятных группах (группы одиночных отцепов) интервалы между отцепами на вершине горки минимальны, что может в дальнейшем привести к их неразделению на стрелках в случае неправильного выбора режима торможения. Поэтому при оптимизации режимов торможения отцепов необходимо установить указанные группы в составе и определить такие режимы торможения, которые максимизируют интервалы между отцепами на стрелках в неблагоприятных группах за счет некоторого их уменьшения в соседних более благоприятных группах.

Решение задачи оптимизации режимов интервального регулирования скорости отцепов в такой постановке возможно при использовании предлагаемого итерационного метода. Метод позволяет найти в расформируемом составе группы последовательных отцепов, близких по условиям разделения, и установить для них такие режимы торможения, при которых интервалы на разделительных стрелках для всех пар отцепов группы одинаковы.

Итерационный метод основан на локальной оптимизации режима торможения среднего отцепа критической группы из трех смежных отцепов, определяемой на каждом шаге итерации.

Критической считается группа отцепов, для которой абсолютная величина разности интервалов на разделительных стрелках во второй и в первой парах отцепов  $|f_i(q_i)|$  максимальна:

$$f_i(q_i) = \delta t_i(q_i, q_{i+1}) - \delta t_{i-1}(q_{i-1}, q_i), i \in [2, n-1] \quad (5.5)$$

Учитывая локальный характер оптимизации, интервалы  $\delta t_{i-1}$ ,  $\delta t_i$  (5.1), соответственно, между отцепами первой и второй пар критической группы рассматриваются как функции режима торможения  $i$ -го отцепа  $q_i$  при фиксированных режимах  $(i-1)$ -го и  $(i+1)$ -го отцепов:

$$\left. \begin{aligned} \delta t_{i-1}(q_i) &= t_{0,i-1} + t_i(q_i, \sigma_{i-1}) - \tau_{i-1}(\sigma_{i-1}) \\ \delta t_i(q_i) &= t_{0,i} + t_{i+1}(\sigma_i) - \tau_i(q_i, \sigma_i) \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

При этом для выбранной критической группы должно выполняться одно из двух условий:

$$\text{если } f_i(q_i) > 0, \text{ то } q_i < q_{i,\max}, \quad (5.7)$$

или

$$\text{если } f_i(q_i) < 0, \text{ то } q_i > q_{i,\min} \quad (5.8)$$

Если же ни одно из этих условий не выполняется, то это означает, что для  $i$ -го отцепа установлен один из двух предельных режимов торможения, который не может быть изменен и, следовательно, группу не следует рассматривать как критическую. Так, если  $f_i(q_i) > 0$ , т.е.  $\delta t_i > \delta t_{i-1}$ , а  $q_i = q_{i,\max}$ , то это означает, что впереди  $i$ -го отцепа расположена группа с неблагоприятными условиями разделения, а за ним – с благоприятными. Установленный при этом для  $i$ -го отцепа режим медленного скатывания  $q_{i,\max}$  обеспечивает максимально возможные интервалы в группе отцепов впереди него за счет сокращения интервалов в следующей за этим отцепом благоприятной группе.

Напротив, если  $f_i(q_i) < 0$ , т.е.  $\delta t_i < \delta t_{i-1}$ , то для  $i$ -го отцепа устанавливается режим быстрого скатывания ( $q_i = q_{i,\min}$ ), который позволяет максимизировать интервалы в группе за этим отцепом за счет их уменьшения в предыдущей благоприятной группе.

Таким образом, на очередном шаге итерации оптимизируется режим торможения одного отцепа состава (среднего отцепа критической группы). В результате корректируются интервалы на стрелках разделения этого отцепа с двумя смежными отцепами. После этого осуществляется переход к следующему шагу итерации, на котором выбирается новая критическая группа и т.д. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие:

$$\max |f_i(q_i)| < \varepsilon, \quad i=2, \dots, n-1, \quad (5.9)$$

где  $\varepsilon$  – допустимая разность интервалов в смежных парах отцепов ( $\varepsilon > \varepsilon_{\text{кр}}$ ).

### 5.3. Оптимизация режимов торможения отцепов критической группы

Оптимальным для среднего отцепа критической группы является такой режим торможения  $q_i^*$ , при котором меньший из двух интервалов  $\delta t_{i-1}$ ,  $\delta t_i$  (5.6) достигнет максимума:

$$\delta t_i^* = \max_{q_i \in Q_i} \min \{ \delta t_{i-1}(q_i), \delta t_i(q_i) \}. \quad (5.10)$$

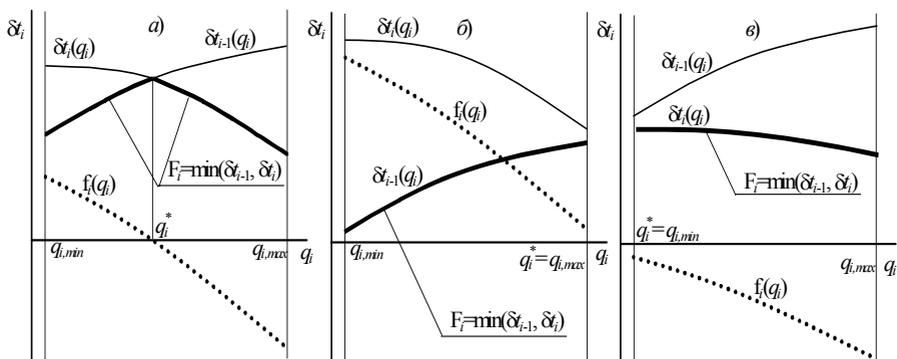
Поиск оптимального режима  $q_i^*$  осуществляется, как было отмечено выше, на границе  $Q_i$  ОДР  $i$ -го отцепа ( $q_i^* \in Q_i$ ). Для этого необходимо найти в интервале  $[q_{i,\min}, q_{i,\max}]$  точку  $q_i^*$ , в которой негладкая функция  $F_i = \min \{ \delta t_{i-1}, \delta t_i \}$  достигает максимума (см. рис. 5.1, а). При этом с точки зрения реализации алгоритма решения целесообразно перейти к эквивалентной задаче поиска нуля функции  $f_i(q_i)$  (5.5), показанной на рис. 5.1, а пунктиром. Учитывая, что функция  $f_i(q_i)$  имеет разрывы первой производной в узлах ОДР, первоначально необходимо локализовать отрезок границы ОДР между двумя смежными узлами, на котором функция  $f_i(q_i)$  принимает нулевое значение и меняет знак. С этой целью необходимо найти такое целочисленное значение  $q'_i$ , при котором  $f_i(q'_i)f_i(q'_i+1) < 0$ . В дальнейшем в интервале  $[q'_i, q'_i+1]$ , в котором  $f_i(q)$  является гладкой функцией, необходимо найти отрезок  $[a, b]$ , удовлетворяющий условиям:

$$f_i(a)f_i(b) < 0, \quad |a - b| < \varepsilon_q, \quad (5.11)$$

где  $\varepsilon_q$  – допустимая погрешность решения.

В качестве окончательной оценки оптимального решения  $q_i^*$  можно принять середину отрезка  $[a, b]$ , т.е.  $q_i^* = (a+b)/2$ .

Если же функция  $f_i(q_i)$  не имеет нуля в интервале  $[q_{i,\min}, q_{i,\max}]$  (см. рис. 5.1, б, в), то в этом случае в качестве оптимального режима  $q_i^*$  принимается соответствующее граничное значение (при  $f_i(q_{i,\min}) > 0$  и  $f_i(q_{i,\max}) > 0$  для среднего отцепа устанавливается режим медленного скатывания  $q_i^* = q_{i,\max}$  (см. рис. 5.1, б), а при  $f_i(q_{i,\min}) < 0$  и  $f_i(q_{i,\max}) < 0$  – режим быстрого скатывания  $q_i^* = q_{i,\min}$  (см. рис. 5.1, в).



**Рисунок 5.1** - Графическое решение задачи оптимизации режима торможения среднего отцепа критической группы

Для поиска нуля функции  $f_i(q_i)$  в интервале  $[q'_i, q'_{i+1}]$  первоначально были использованы традиционные методы (деления пополам, золотого сечения, линейной интерполяции). Однако метод линейной интерполяции оказался недостаточно надежным, а другие методы не обеспечивали необходимого быстродействия. Поэтому, принимая во внимание особенности целевой функции, был разработан регуляризованный метод поиска нуля функции  $f_i(q_i)$  [69], являющийся комбинацией методов деления пополам и линейной интерполяции. Сущность метода заключается в следующем. На некотором этапе поиска по двум лучшим точкам  $q_1, q_2$ , найденным на предыдущих этапах, строится линейная аппроксимирующая функция, которая принимает нулевое значение в точке  $u$ :

$$u = q_2 - \frac{q_2 - q_1}{f(q_2) - f(q_1)} f(q_2). \quad (5.12)$$

Полученная точка используется для построения следующего приближения, если она принадлежит текущему интервалу неопределенности  $u \in [q_a, q_b]$  и при этом

$$|u - q_1| < \frac{q_a + q_b}{2}. \quad (5.13)$$

Если эти условия не выполняются, то на данном этапе точка  $u$  заменяется серединой интервала неопределенности  $u = (q_a + q_b)/2$ .

После выбора точки  $u$  осуществляется корректирование границ интер-

вала неопределенности и списка лучших точек. Поиск продолжается, пока  $|f(u)| > \epsilon_{кр}$ , где  $\epsilon_{кр}$  – точность выравнивания интервалов в критической группе отцепов. Указанный метод позволил более чем в три раза сократить число итераций при поиске нуля функции  $f(q)$  и за счет этого существенно ускорить процесс оптимизации режимов торможения.

Разработанный алгоритм поиска нуля функции  $f(q)$  был реализован с использованием численных методов представления функций  $t(q, \sigma)$  и  $\tau(q, \sigma)$ , входящих в (5.6) и в целевую функцию (5.10). С этой целью для каждого отцепа состава должна быть задана таблица значений  $t$  и  $\tau$ , найденных для различных режимов торможения  $q_j$ , которые расположены в узловых и промежуточных точках границы ОДР (раздельно для ее верхнего и нижнего участка). Указанные значения  $t$  и  $\tau$  находят предварительно для всех разделительных стрелок горки  $\sigma$  с помощью имитационного моделирования скатывания отцепов. В процессе итераций для нахождения значений времени  $t$  и  $\tau$  при произвольных режимах торможения  $q$  используются интерполяционные многочлены Ньютона, которые строятся отдельно для каждого отрезка ОДР, где производные функций  $t(q)$  и  $\tau(q)$  остаются непрерывными.

#### **5.4. Анализ результатов оптимизации режимов торможения отцепов состава итерационным методом**

Для анализа особенностей итерационного метода рассмотрен пример оптимизации режимов торможения для состава из 25 отцепов, данные о котором приведены в табл. 5.1. Перед началом оптимизации для каждого отцепа был установлен начальный режим торможения, определяемый значением  $q_{oi}$ ; при этом для отцепов с четными номерами в качестве начальных были приняты соответствующие максимальные ( $q_{oi} = q_{i,max}$ ), а с нечетными – минимальные ( $q_{oi} = q_{i,min}$ ) значения параметра  $q$ . Интервалы  $\delta t_i$  на разделительных стрелках, образующиеся при таких режимах торможения, показаны на рис. 5.2 (линия 1); как видно, указанные интервалы имеют значительный разброс и в отдельных случаях их значения недопустимы ( $\delta t_i < 1c$ ).

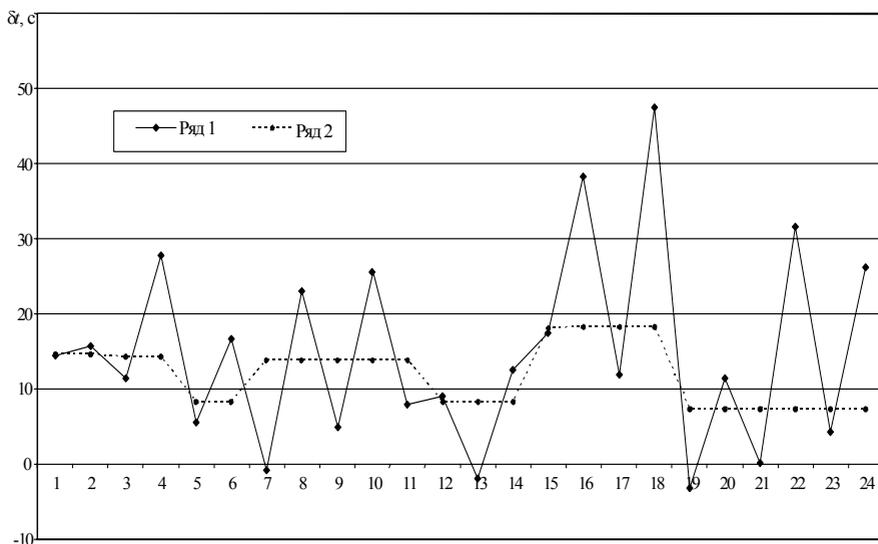
В процессе оптимизации происходит корректирование режимов торможения в критических группах с целью выравнивания интервалов  $\delta t$  в смежных парах отцепов. Так, на I-й итерации в качестве критической была выбрана группа, включающая 18-й, 19-й и 20-й отцепы, в которой разность интервалов  $\delta t$  оказалась максимальной ( $\delta t_{18}=47,53$  с,  $\delta t_{19}=-3,24$  с и  $|f(q_i)|=50,77$  с). В результате оптимизации для среднего 19-го отцепа был установлен режим быстрого скатывания ( $q_{19}=1,0$ ), после чего интервалы в группе изменились:  $\delta t_{18}=31,3$  с,  $\delta t_{19}=5,7$  с; как видно в данном случае равенство интервалов не было достигнуто, поскольку для 19-го отцепа значение  $q_{19}=1,0$  является минимальным.

Для иллюстрации характера итерационного процесса для данного состава на рис. 5.3 приведен график изменения абсолютной величины функции  $f(q)$  для критических групп отцепов по мере увеличения номера итерации. Как видно из приведенного рисунка, на первых 20 шагах значение  $|f(q)|$  резко падает от 50,77 до 3,31 с. При этом на этих шагах определяются отцепы, разделяющие состав на благоприятные и неблагоприятные группы (отцепы 3, 5, 7, 12, 15 и 19), и для них устанавливаются соответствующие предельные режимы торможения  $q$  (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1

## Результаты оптимизации режимов торможения отцепов состава

Номер отцепа	Длина отцепа $l$ , м	Основное сопротивление $w_0$ , Н/кН	Номер стрелки разделения $\sigma$	Начальный интервал $t_0$ , с	Режим торможения				Интервал на стрелке разделения $\delta t$ , с
					$q_{\min}$	$q_{\max}$	$q_0$	$q^*$	
1	29,46	2,20	3	19,74	0	3	0	0(Б)	14,556
2	41,76	2,10	2	23,11	0	2	0	0,750	14,558
3	12,02	3,90	2	11,74	0	1	1	0(Б)	14,222
4	77,82	1,05	3	44,83	0	2	0	1,725	14,232
5	13,92	4,50	2	9,21	1	2	2	1(Б)	8,238
6	29,46	1,10	2	20,09	0	2	0	1,953	8,224
7	41,76	1,44	4	26,74	0	2	2	2(М)	13,816
8	48,08	1,24	2	30,20	0	3	0	2,937	13,822
9	48,08	1,44	2	25,88	0	2	2	1,042	13,810
10	13,92	2,00	3	14,33	0	2	0	1,580	13,798
11	72,12	1,39	2	38,93	0	3	3	2,741	13,815
12	13,92	0,50	2	9,84	0	2	0	0(Б)	8,286
13	13,92	3,50	3	9,73	0	1	1	0,722	8,262
14	29,24	1,25	2	17,49	1	3	1	2,717	8,249
15	13,92	4,00	2	14,30	0	1	1	1(М)	18,172
16	91,74	1,32	3	50,53	0	2	0	1,337	18,190
17	13,92	1,00	2	14,69	1	3	3	2,540	18,191
18	94,54	1,29	4	53,27	0	2	0	1,554	18,182
19	13,92	1,50	2	8,65	1	2	2	1(Б)	7,324
20	14,73	1,40	2	11,18	0	2	0	1,399	7,306
21	27,84	0,83	2	16,04	0	2	2	1,639	7,312
22	13,92	3,00	5	8,50	0	2	0	1,955	7,324
23	13,92	2,50	2	12,91	1	2	2	1,909	7,346
24	55,68	1,28	4	30,90	0	2	0	1,975	7,370
25	14,62	3,60	-	-	0	3	3	3(М)	-

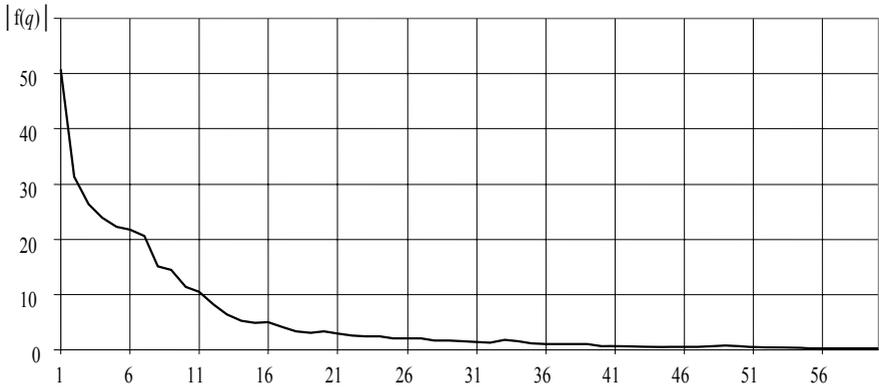


**Рисунок 5.2** - Интервалы между отцепами состава: 1 – перед первой итерацией; 2 – после заключительной итерации. Начальный режим: Нечетные отцепы -  $q_{\max}$ , четные -  $q_{\min}$ ,  $\varepsilon=0,025$

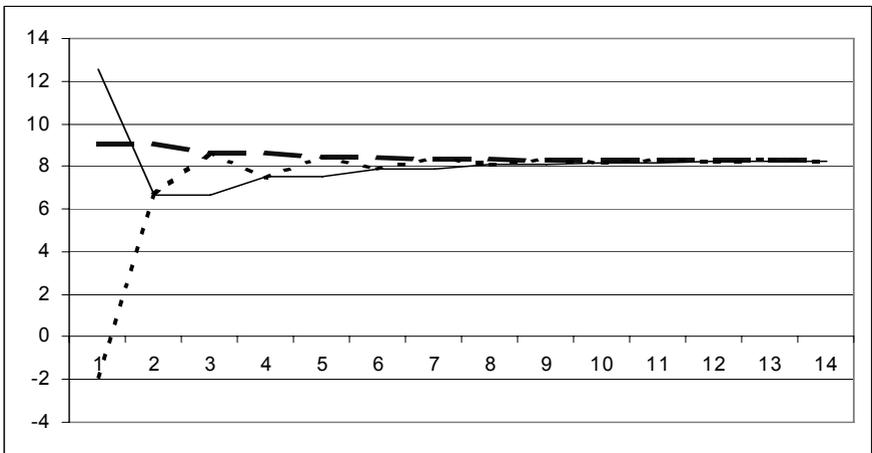
В результате выбора таких режимов уменьшаются интервалы  $\delta t$  на стрелках разделения указанных отцепов с отцепами благоприятных групп и, соответственно, увеличиваются – с отцепами групп неблагоприятных, что позволяет увеличить интервалы  $\delta t$  в таких группах.

На последующих итерациях (после 20-й) происходит окончательное выравнивание интервалов  $\delta t$  во всех образовавшихся группах отцепов с одинаковыми условиями разделения.

Для примера на рис. 5.4 показан процесс выравнивания интервалов в группе отцепов 12-15. В этой группе первоначально интервалы существенно различались ( $\delta t_{12}=9,12$  с,  $\delta t_{13}=-1,90$  с,  $\delta t_{14}=12,56$  с). В процессе итераций происходит перераспределение интервалов в данной группе, так что к концу решения они становятся практически одинаковыми и равными 8,3 с (см. табл. 5.1); при этом изменения  $\delta t_i$  на отдельных шагах зачастую имеют сложный колебательный характер (см. рис. 5.4).



**Рисунок 5.3** - График изменения функции  $|f(q)|$  при увеличении номера итерации



**Рисунок 5.4** - Итерационный процесс выравнивания интервалов в группе отцепов 12-15

Поэтому для окончательного выравнивания интервалов требуется, как правило, достаточно большое число итераций, которое зависит от заданной точности решения. Например, при  $\epsilon = 0,025$  с для выравнивания интервалов между отцепами группы 15-19 потребовалось 29 итераций (16-й отцеп – 11, 17-й – 12 и 18-й – 6 итераций); при этом общее число итераций для оптимизации режимов данного состава  $N=119$ .

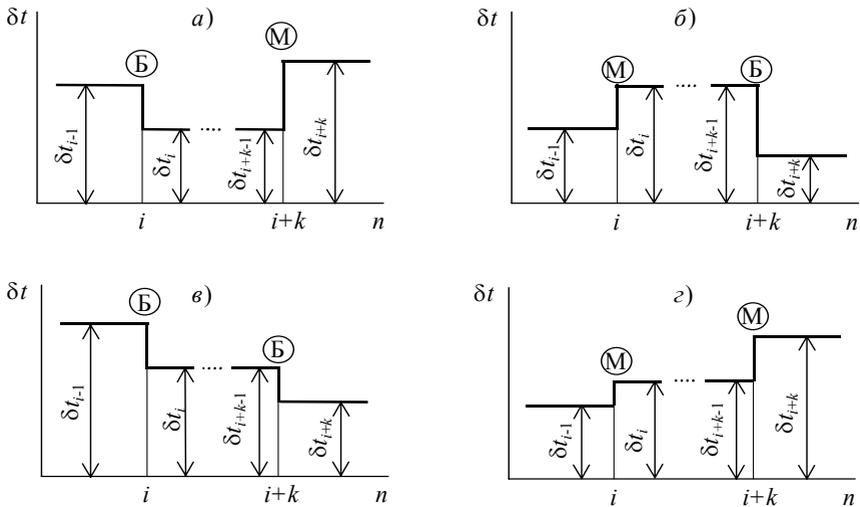
Окончательное распределение интервалов  $\delta t$  в рассматриваемом составе по завершении оптимизации показано на рис. 5.2 пунктиром (линия 2). Оптимальные значения параметра  $q_i^*$ , характеризующие режимы торможения отцепов указанного состава и соответствующие интервалы на разделительных стрелках  $\delta t_p$ , приведены в табл. 5.1.

Анализ полученных значений параметра  $q_i^*$  показывает, что в составе для ряда отцепов установлены предельные (максимальные для отцепов 7 и 15, и минимальные для отцепов 3, 5, 12 и 19) значения  $q_i^*$  (выделены в табл. 5.1 штриховкой); эти значения обеспечивают для данных отцепов, соответственно, режимы медленного (М) или быстрого (Б) скатывания. Указанные отцепы делят состав на группы с различными условиями скатывания; при этом в каждой такой группе эти условия (интервалы  $\delta t$ ) одинаковы. Предельные режимы торможения всегда устанавливаются также для первого и для последнего отцепов состава. При этом, для первого отцепа принято  $q_1=q_{1,\min}$  (Б), а для последнего –  $q_n=q_{n,\max}$  (М), что позволяет обеспечить наилучшие условия разделения, соответственно, первой и последней пар отцепов в составе.

В результате оптимизации рассматриваемый состав оказался разделенным на 7 групп (1-3-5-7-12-15-19-25), для каждой из которых установлено индивидуальное значение интервала  $\delta t$ , одинаковое для всех пар отцепов группы (соответственно, 14,64; 14,2; 8,2; 13,8; 8,3; 18,2 и 7,3 с).

Как показал анализ результатов оптимизации большого числа составов, возможны 4 варианта взаимного размещения отцепов с предельными режимами торможения  $q_{\min}$  и  $q_{\max}$  (Б-М, М-Б, Б-Б и М-М). Как видно из рис. 5.5, *a-z*, такие отцепы делят состав на части с одинаковыми условиями разделения ( $\delta t_i=\delta t_{i+1}=\dots=\delta t_{i+k-1}$ ). В первом случае (Б-М) между  $i$ -м отцепом (режим торможения Б) и  $(i+k)$ -м отцепом (режим М) находится группа с неблагоприятными условиями разделения на стрелках, в которой  $\delta t_{i-1}>\delta t_i=\delta t_{i+1}=\dots=\delta t_{i+k-1}<\delta t_{i+k}$  (см. рис. 5.5, *a*). При этом быстрый режим первого и медленный

режим последнего отцепов группы  $i-(i+k)$  позволяют максимально увеличить интервалы  $\delta t_i - \delta t_{i+k-1}$  за счет некоторого уменьшения интервалов  $\delta t_{i-1}$  и  $\delta t_{i+k}$  в смежных благоприятных группах. В рассматриваемом составе имеется 3 группы таких отцепов: 5–7, 12–15 и 19–25.



**Рисунок 5.5** - Схемы взаимного расположения в составе отцепов с предельными режимами торможения

Во втором случае (М-Б) между отцепами  $i$  (режим торможения М) и  $i+k$  (режим Б) находится группа с благоприятными условиями разделения на стрелках, в которой  $\delta t_{i-1} < \delta t_i = \delta t_{i+1} = \dots = \delta t_{i+k-1} > \delta t_{i+k}$  (см. рис. 5.5, б). При этом медленный режим первого и быстрый режим последнего отцепов данной группы позволяют до минимума сократить интервалы  $\delta t_i - \delta t_{i+k-1}$  в группе и за счет этого увеличить интервалы  $\delta t_{i-1}$  и  $\delta t_{i+k}$  в смежных неблагоприятных группах. В рассматриваемом составе 2 группы (М-Б): 7–12 и 15–19.

Наконец в случаях (Б-Б) (рис. 5.5, в) и М-М (рис. 5.5, з) между  $i$ -м и  $(i+k)$ -м отцепами находится группа с некоторыми средними условиями разделения, в которой интервалы  $\delta t$  имеют промежуточное значение между интервалами неблагоприятных и благоприятных групп. При этом в случае режимов (Б-Б) интервалы  $\delta t$  при переходе от группы к группе уменьшаются

$(\delta t_{i-1} > \delta t_i, \delta t_{i+k-1} > \delta t_{i+k})$ , а при режимах (М-М) – увеличиваются  $(\delta t_{i-1} < \delta t_i, \delta t_{i+k-1} < \delta t_{i+k})$ . Таким образом, выбор для указанных отцепов предельных режимов Б и М позволяет максимально увеличить интервалы  $\delta t$  в неблагоприятных группах за счет их сокращения в смежных благоприятных группах. Для остальных отцепов каждой такой части состава оптимальные значения параметра  $q_i^*$  устанавливаются из условия обеспечения равных интервалов  $\delta t$  и, следовательно, условий разделения для всех пар отцепов группы.

Анализ результатов оптимизации показывает, что основное влияние на величину найденного интервала  $\delta t_i$  в паре отцепов  $(i, i+1)$  оказывает начальный интервал  $t_{0i}$  между ними на вершине горки, который, как известно, определяется, главным образом, длиной первого отцепа в паре  $l_{отцi}$ :

$$t_{0i} = \frac{l_{отцi} - s_{0i} + s_{0,i+1}}{v_0}, \quad (5.14)$$

где  $s_{0i}, s_{0,i+1}$  – координаты точек отрыва, соответственно,  $i$ -го и  $(i+1)$ -го отцепов;

$v_0$  – скорость роспуска состава, м/с.

Как видно из табл. 5.1, начальные интервалы  $t_{0i} < 10$  с, которые образуются при наличии в составе двух и более коротких смежных отцепов, приводят к образованию групп, неблагоприятных по условиям разделения (отцепы 5-7 –  $\delta t = 8,2$  с; отцепы 12-15 –  $\delta t = 8,3$  с; отцепы 19-25 –  $\delta t = 7,3$  с).

Сопrotивление движению отцепов  $w_0$  на величину интервалов  $\delta t$  влияет неоднозначно. Так, в парах отцепов, ходовые качества которых существенно различаются (сочетание П-Х – пары 5-6 и 13-14; сочетание Х-П – пары 12-13, 14-15, 21-22, 24-25), интервалы минимальны, а указанные пары находятся в неблагоприятных группах. В то же время в парах 3-4 (П-Х) и 4-5 (Х-П) интервалы  $\delta t$  достаточно велики (14,2 с), а сами пары относятся к благоприятным группам.

## 5.5. Исследование и оценка эффективности итерационного метода оптимизации режимов торможения отцепов состава

Эффективность разработанного метода оптимизации определяется числом итераций  $N$ , необходимых для поиска оптимальных режимов торможения отцепов состава. Для исследования влияния различных факторов на число итераций, была выполнена оптимизация режимов торможения отцепов 102 составов, в которых номера разделительных стрелок были получены с помощью статистического моделирования. При этом для каждого состава использовались различные методы (1-7) выбора начальных значений компонент вектора режимов торможения отцепов  $\mathbf{q}_0=(q_{02}, q_{03}, \dots, q_{0,n-1})$  (см. табл. 5.2):

- 1 – минимальные значения  $q_{oi}=q_{i,\min}$ ;
- 2 – максимальные значения  $q_{oi}=q_{i,\max}$ ;
- 3 – средние значения  $q_{oi}=(q_{i,\min}+q_{i,\max})/2$ ;
- 4 – случайные значения  $q_{oi}=q_{i,\min}+(q_{i,\max} - q_{i,\min})R_i$ , где  $R_i$  – случайное число, равномерно распределенное в интервале  $[0, 1]$ ;
- 5 – чередующиеся минимальные и максимальные значения ( $q_{oi}=q_{i,\min}$  при  $i \bmod 2=0$  (четные номера отцепов), иначе –  $q_{oi}=q_{i,\max}$ );
- 6 – чередующиеся максимальные и минимальные значения ( $q_{oi}=q_{i,\max}$  при  $i \bmod 2=0$ , иначе –  $q_{oi}=q_{i,\min}$ );
- 7 – расчетные значения  $q_{oi}=f(\mathbf{X})$ , где  $\mathbf{X}$  – вектор параметров, определяющих значение  $q_0$ .

В табл. 5.2 для каждого из методов 1-7 приведены статистические параметры распределения случайного числа итераций  $N$ , необходимого для оптимизации режимов торможения отцепов состава при точности выравнивания интервалов  $\varepsilon$  (5.9) равной 0,025 с. Указанные параметры установлены в результате статистической обработки выборок из 102 значений  $N$ , полученных при оптимизации соответствующего числа составов с использованием каждого из 7 методов. В данной таблице приняты следующие обозначения:

$N_{\min}$ ,  $N_{\max}$ ,  $N_{\text{cp}}$  – соответственно, минимальное, максимальное и среднее число итераций, необходимое для оптимизации одного состава при данном методе выбора значений  $q_{oi}$ ;

$S_N$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины  $N$ ;

$P_c$  – доля составов в их общей совокупности, для которых данный метод обеспечивал минимальное число итераций;

$\delta t_{\min}^*$  – значение минимального интервала между отцепами для всей совокупности составов;

$r$  – коэффициент корреляции числа итераций  $N$  и длины  $k$  максимальной цепи отцепов состава, у которых режимы торможения не являются экстремальными.

Таблица 5.2

Число итераций при различных методах определения начальных режимов торможения отцепов

Метод	$N_{\min}$	$N_{\max}$	$N_{\text{cp}}$	$S_N$	$P_c$	$\delta t_{\min}^*$	$r$
1	67	301	143,7	42,9	0,00	0,92	0,54
2	89	275	146,5	38,9	0,04	0,89	0,56
3	67	289	127,4	40,1	0,08	0,92	0,44
4	66	265	127,9	34,5	0,09	0,92	0,51
5	46	292	124,9	39,1	0,15	0,92	0,54
6	49	232	121,9	35,7	0,24	0,90	0,48
7	62	241	115,4	34,1	0,40	0,92	0,48

Как видно из таблицы, число итераций для отдельных составов колеблется в широких пределах для всех методов; при этом при принятой высокой точности выравнивания интервалов ( $\varepsilon=0,025$  с) окончательные результаты оптимизации каждого состава (режимы  $q_i^*$ , интервалы  $\delta t$  а также минимальный интервал  $\delta t_{\min}^*$ ) одинаковы для всех методов.

Статистический анализ показал, что при любом методе выбора  $q_{oi}$  число итераций  $N$  представляет собой случайную величину, имеющую логарифмически-нормальное распределение. Для проверки гипотезы о законе рас-

пределения использовался критерий согласия  $\chi^2$ , вычисленный по данным выборки ( $N_1, N_2, \dots, N_{102}$ ), статистический ряд распределения которой приведен в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Расчет  $\chi^2$  для выборки значений случайной величины  $N$

Интервал $N$	$m$	$P$	$np$	Параметры
50 – 75	7	0,056	5,76	$N_{\min}=49$ $N_{\max}=232$ $N_{\text{ср}}=121,9$ $S_N=35,7$ $\chi^2_N=4,86$
75 – 100	19	0,2260	23,01	
100 – 125	36	0,299	30,53	
125 – 150	18	0,220	22,39	
150 – 175	12	0,116	11,85	
175 – 200	8	0,051	5,22	
200 – 225	1	0,020	2,06	
225 – 250	1	0,012	1,17	
	102	1,000	101,99	

Отдельные значения  $p_i$  в табл. 5.3 вычислялись как:

$$p_i = \Phi\left(\frac{\ln x_i - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\ln x_{i-1} - \mu}{\sigma}\right),$$

где  $\mu = \overline{\ln N}$  и  $\sigma = \sigma_{\ln N}$ .

При уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числе степеней свободы  $v=(7-1)-2=4$  квантиль  $\chi^2_{4,0,95}=9,49$ ; так как по опытным данным (см. табл. 5.3)  $\chi^2_N=4,86 < 9,49$ , то можно признать, что случайная величина  $N$  подчинена логарифмически-нормальному закону распределения.

Одним из основных параметров, влияющих на число итераций  $N$ , необходимое для оптимизации состава, является вектор номеров разделительных стрелок, поскольку именно их различием для отдельных составов объясняется разброс числа итераций в интервале  $[N_{\min}, N_{\max}]$  для всех рассмотренных методов 1-7 (см. табл. 5.2).

Для повышения эффективности разработанного метода и минимизации необходимого числа итераций был выполнен анализ влияния на итерационный процесс различных факторов при разных методах выбора начальных значений  $q_{0i}$ .

Число итераций  $N$ , как правило, в несколько раз превышает число отцепов в составе, что свидетельствует о многократном изменении режима торможения  $q_i$  большинства отцепов. В процессе итераций происходит последовательная передача избытка интервала  $\delta t$  от благоприятной пары отцепов к неблагоприятной по цепи пар отцепов с промежуточными значениями  $q_i$  и поэтому число итераций  $N$  зависит от ее длины. При этом по мере выравнивания интервалов между отцепами величина передаваемого интервала уменьшается, что еще больше удлиняет итерационный процесс. Данный вывод подтверждается наличием линейной корреляционной связи между длиной  $k$  максимальной цепи отцепов в составе, у которых  $q_{i,\max} < q_i < q_{i,\max}$ , и необходимым числом итераций  $N$  для этого состава (см. рис. 5.6); значения соответствующих коэффициентов корреляции  $r$  для разных методов приведены в табл. 5.2.

Наибольшее число итераций требуется при использовании методов 1 и 2 (см. табл. 5.2); при этом весьма редко ( $P \leq 0,04$ ) встречаются составы, для которых они являются наилучшими (обеспечивают наименьшее среди всех методов число итераций). Одной из главных причин данного факта является то, что при этих методах начальные значения  $q_{oi}$  можно изменять только в одном направлении (увеличивать в методе 1 или уменьшать в методе 2).

Напротив, методы 5 и 6 требуют в среднем меньшего числа итераций, поскольку при них минимальные и максимальные значения  $q_{oi}$  чередуются и поэтому пары отцепов для выравнивания интервалов находятся, как правило, ближе друг к другу. Методы 3 и 4 занимают промежуточное положение.

Как оказалось, наименьшее число итераций требуется при использовании метода 7, в котором начальные значения  $q_{oi}$  вычисляются с помощью предварительно полученного уравнения  $q_{oi} = f(\mathbf{X})$ . В данном методе для определения начальных значений  $q_{oi}$  использовалась линейная статистическая модель

$$q_{oi} = f(l_{i-1}, l_i, l_{i+1}, \sigma_{i-1}, \sigma_i),$$

коэффициенты которой были предварительно получены с помощью регрессионного анализа по результатам оптимизации режимов торможения ряда составов:

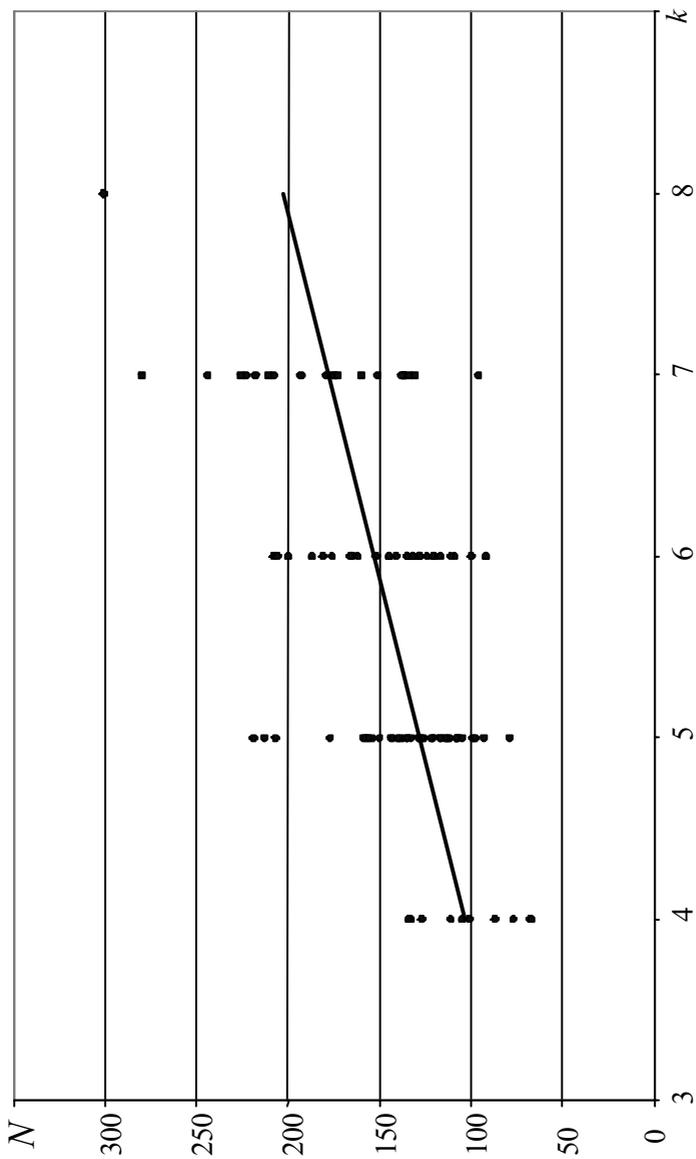
$$q_{oi}=0,853-0,00807 l_{отц(i-1)}+0,014 l_{отцi}+0,011 l_{отц(i+1)}+0,155 \sigma_{i-1}-0,139 \sigma_i.$$

В данной модели  $l_{отц}$  – длины трех смежных отцепов расчетной группы,  $\sigma$  – номера соответствующих разделительных стрелок.

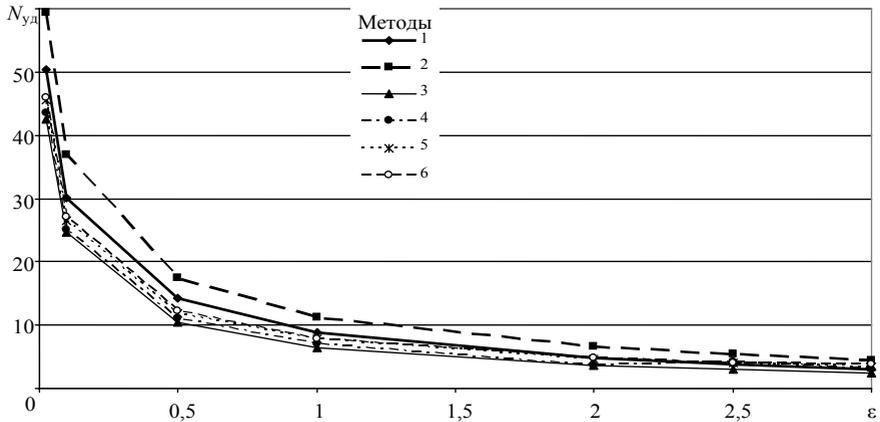
Однако, точность аппроксимации статистических данных с помощью линейной модели оказалась невелика (остаточная дисперсия  $S_{ост}^2 = 0,437$ ) и полученные с ее использованием значения  $q_{oi}$  оказались для отдельных отцепов весьма далеки от оптимальных и иногда выходили за допустимые пределы  $[q_{i,min}, q_{i,max}]$ . Поэтому эффект от предсказания оптимальных значений  $q_i$  оказался незначительным (число итераций сократилось в среднем на 5%) и в дальнейшем указанный метод не использовался. Общая продолжительность решения задачи оптимизации зависит как от числа итераций  $N$ , так и от скорости выравнивания интервалов в критической группе отцепов, которое выполняется на каждой итерации.

Поэтому существенное влияние на эффективность итерационного метода оказывает точность выравнивания интервалов  $\varepsilon$  в смежных парах отцепов состава, а также в выбираемых на каждой итерации критических группах  $\varepsilon_{кр}$ . Наилучшие результаты оптимизации были получены, когда указанные величины принимались одинаковыми ( $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$ ).

Для оценки эффективности отдельных методов выбора начальных значений  $q_{oi}$  для каждого из них были получены зависимости удельного общего числа итераций  $N_{уд}$  (с учетом выравнивания интервалов в критических группах) в расчете на один отцеп состава от величины  $\varepsilon$ . Оказалось, что для всех методов величина  $N_{уд}$  экспоненциально уменьшается по мере возрастания  $\varepsilon$  (см. рис. 5.7); при этом лучшим оказался метод 3, для которого необходимо наименьшее число итераций  $N_{кр}$  для выравнивания интервалов в критической



**Рисунок 5.6** - Зависимость числа итераций от длины максимальной цепи отцепов в составе



**Рисунок 5.7** - Зависимость общего числа итераций (с учетом выравнивания каждой пары) от точности  $\varepsilon$  для разных методов

группе (при  $\varepsilon_{кр}=0,025$  с величина  $N_{кр}$  составляет в среднем 8,4, тогда как для наихудшего в этом отношении метода 2  $N_{кр}=10,2$ ).

Данная разница объясняется шириной начального интервала  $\Delta q$ , в котором осуществляется поиск оптимального значения  $q^*$ : для метода 3  $\Delta q=(q_{i,\min}-q_{i,\max})/2$ , тогда как для метода 2 величина  $\Delta q$  в два раза больше.

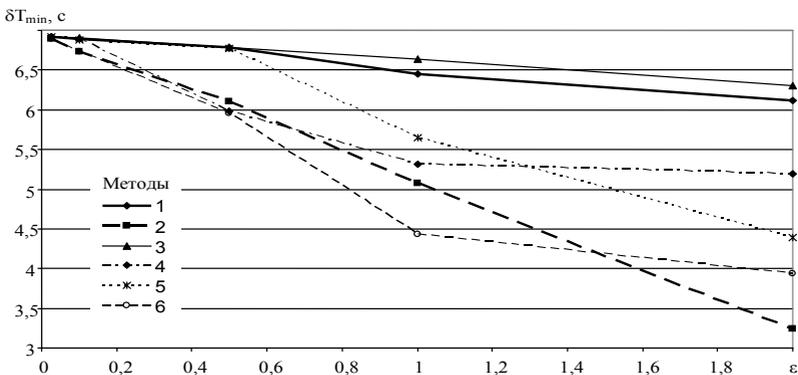
### 5.6. Выбор критерия завершения итерационного процесса

Анализ полученных зависимостей  $N=f(\varepsilon)$  свидетельствует о возможности использования для практических целей значения точности выравнивания интервалов в смежных парах отцепов  $\varepsilon = 1-2$  с, что позволит резко уменьшить необходимое число итераций (до 3-4 на один отцеп). Однако, как показали многочисленные расчеты, при этом может существенно ухудшиться качество решения за счет уменьшения величины минимального интервала между отцепами  $\delta t_{\min}$  для некоторых составов; при этом интервал  $\delta t_{\min}$ , может уменьшиться на величину, которая в несколько раз превышает установленное значение  $\varepsilon$ . Оказалось, что в составе случайным образом может образоваться последовательность из  $k$  монотонно убывающих (возрастающих) интервалов

$\delta t_i > \delta t_{i+1} > \dots > \delta t_{i+k-1}$ ; при этом  $\delta t_i > \delta t_{i-1}$  и  $\delta t_{i+k-1} > \delta t_{i+k}$ . В указанной последовательности разность смежных интервалов невелика ( $\delta t_i - \delta t_{i+1} \leq \epsilon$ ), однако разность крайних значений последовательности может быть существенна ( $\delta t_i - \delta t_{i+k-1} \leq k \cdot \epsilon$ ), так что при достаточно больших значениях  $\epsilon$  интервал  $\delta t_{i+k-1}$  может быть значительно меньше остальных. На рис. 5.8 приведены зависимости минимального интервала  $\delta t_{\min}$ , найденного для совокупности 102 составов, от установленной точности  $\epsilon$  для разных методов. Как видно из приведенного рисунка, величина  $\delta t_{\min}$  существенно уменьшается с ростом  $\epsilon$  для всех методов, кроме 1 и 3. В этой связи для повышения качества решения оптимизационной задачи условие (5.9) завершения итераций по составу было дополнено условием  $\delta t_i \geq \delta T_{\min}$ ,  $i=1, \dots, n-1$ , которое препятствует чрезмерному уменьшению интервалов между отцепами. Были исследованы различные комбинации значений  $\epsilon$  и  $\delta T_{\min}$ ; оказалось, что рациональным является сочетание высокой точности выравнивания интервалов ( $\epsilon=0,025c$ ) с величиной  $\delta T_{\min}$ , устанавливаемой индивидуально для каждого состава как

$$\delta T_{\min} = \min \{ \max \delta t_1, \max \delta t_2, \dots, \max \delta t_{n-1} \} - \Delta, \quad (5.15)$$

$$\max \delta t_i = \delta t_i (q_{i,\min}, q_{i+1,\max}).$$



**Рисунок 5.8** - Зависимость минимального интервала для совокупности составов от точности  $\epsilon$  для разных методов

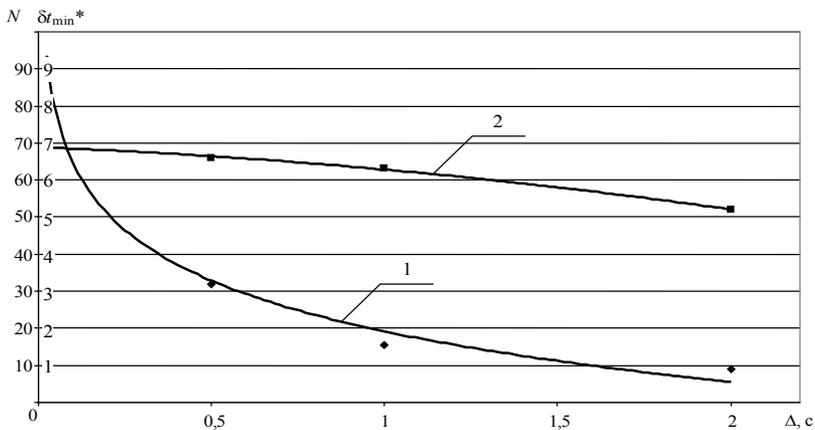
Величина  $\Delta$  определяет допустимый диапазон отклонения найденных в результате оптимизации интервалов  $\delta t_i$  от их наилучших (максимальных) значений и соответствующее число итераций  $N$ . Для оценки эффективности предложенного критерия прекращения итераций (5.15) была выполнена оптимизация рассмотренных ранее 102 составов при различных значениях  $\Delta$  и методах выбора  $q_{0i}$  (см. табл. 5.4).

Выбор допустимой величины  $\Delta$  уменьшения минимального интервала между отцепами, с которыми связано и необходимое число итераций, может осуществляться на основе полученных зависимостей (см. рис. 5.9), исходя из требований конкретной задачи. Таким образом, выполненные исследования позволили установить основной принцип выбора оптимального режима роспуска состава, заключающийся в том, чтобы обеспечить наилучшие условия разделения на стрелках отцепов всех неблагоприятных групп состава. Разработанный итерационный метод оптимизации позволяет установить указанные группы в составе и определить для всех его отцепов такие режимы торможения, при которых в этих группах интервалы на разделительных стрелках максимальны.

Таблица 5.4

Результаты оптимизации режимов торможения при ограничении минимального интервала между отцепами

Метод	$\Delta=0,025$ с		$\Delta=0,5$ с		$\Delta=1,0$ с		$\Delta=2,0$ с	
	$N$	$\delta t_{\min}^*$	$N$	$\delta t_{\min}^*$	$N$	$\delta t_{\min}^*$	$N$	$\delta t_{\min}^*$
1	104,4	6,91	38,1	6,58	23,5	6,25	10,3	5,19
2	131,3	6,89	72,3	6,51	54,2	6,00	36,2	5,21
3	92,7	6,90	32,0	6,59	15,6	6,32	9,1	5,20
4	94,0	6,91	32,4	6,47	22,5	6,17	14,0	5,25
5	95,5	6,90	37,4	6,43	27,3	6,24	21,1	5,14
6	99,4	6,89	48,5	6,53	35,5	6,00	23,8	5,19



**Рисунок 5.9** - Зависимости результатов оптимизации от допустимой величины уменьшения минимального интервала между отцепами: 1 – число итераций; 2 – глобальный минимум интервала

Как видно из приведенной таблицы, при  $\Delta=0,025$  с результаты оптимизации (интервал  $\delta t_{\min}^*$ ) практически совпали с полученными ранее (см. табл. 5.2), однако число итераций при этом существенно сократилось (от 10% для метода 2 до 27% для методов 1, 3 и 4). С ростом  $\Delta$  вплоть до 1 с величина  $\delta t_{\min}^*$  уменьшается весьма незначительно (до 8%), а необходимое число итераций для лучшего из методов (3) уменьшается при этом в 8 раз (см. рис. 5.9). Полученные данные свидетельствуют о том, что предложенный критерий окончания итерационного поиска оказался весьма эффективным; при этом одновременно установлено, что наилучшим выбором начальных режимов торможения отцепов состава  $q_{oi}$  являются их средние значения (метод 3).

Исследования механизма итерационного процесса позволили установить рациональный критерий окончания оптимизации и наилучший метод выбора начальных режимов торможения отцепов. Полученные при этом зависимости могут быть использованы для выбора компромисса между точностью решения и необходимым числом итераций в соответствии с условиями конкретной задачи.

Модель процесса расформирования составов, построенная на основе итерационного метода, может быть использована для совершенствования

конструкции сортировочных горок и технологии роспуска составов; она может также оказаться полезной при создании систем автоматизации сортировочного процесса.

### 5.7. Минимизация энергетических расходов на управление скоростью скатывания отцепов состава

Для анализа методики оптимизации энергетических расходов на управление роспуском выполнена серия экспериментом с составом из пяти одновагонных отцепов (см. Приложение Д.1). Области допустимых режимов торможения указанных отцепов приведены в Приложении Д.2. В качестве минимального допустимого интервала на разделительных элементах принято  $\delta t_{\min}=3$  с. На реальных горках указанное значение должно выбираться в соответствии с техническим оснащением горки.

На предварительном этапе оптимизации выполнено моделирование скатывания всех  $k_c$  отцепов состава и, в соответствии с методикой, изложенной в п. 4.6, определены предельные значения параметров  $Z_i$  (см. табл. 5.5) и построены области эффективных режимов торможения  $\Omega_{\sigma_i}(\bar{E}_{\text{отц}})$ ,  $i=1\dots k_c$ , соответствующие границам участков ОДР, на которых достигаются максимальные интервалы (см. табл. 5.6). В результате оптимизации режимов торможения отцепов состава итерационным методом (см. Приложение Д.3) установлено, что на разделительных стрелках могут быть достигнуты интервалы  $\delta t=6,2$  с; при этом расходы электроэнергии составляют  $\sum \bar{E}_{\text{отц}}=1,164$  кВт·ч. Полученные результаты показывают, что при заданной скорости роспуска интервалы на разделительных стрелках могут существенно превышать установленную минимальную величину  $\delta t_{\min}=3$  с. В этой связи необходимо рассмотреть возможность сокращения энергетических расходов на торможение отцепов.

С этой целью в ОДР каждого отцепа выделена область эффективных режимов торможения, соответствующая минимальным расходам энергии  $\Omega_{\sigma_i}(\underline{E}_{\text{отц}})$  (см. табл. 5.7).

В результате оптимизации итерационным методом (см. Пр. Д.4) установлено, что при минимально возможных расходах энергии  $\sum \underline{E}_{\text{отц}}=0,612$  кВт·ч минимальный интервал между отцепами на разделитель-

ных интервалах составляет  $\delta t^* = 2,04$  с. Распределение интервалов по составу представлено на рис. 5.10. Учитывая, что  $\delta t^* < \delta t_{\min}$  то полученное решение не является допустимым.

Таблица 5.5

Предельные значения параметра  $Z$  для отцепов состава

Отцеп	$t_{\min}$	$t_{\max}$	$\tau_{\min}$	$\tau_{\max}$	$Z_{\min}$	$Z_{\max}$
1	-	-	53,836	53,836	-	-
2	45,237	77,467	49,128	86,593	97,103	124,472
3	43,267	70,636	39,432	62,629	86,224	157,051
4	37,096	70,458	27,185	34,564	64,200	87,532
5	24,768	24,903	-	-	-	-

Таблица 5.6

Области эффективных режимов торможения отцепов состава, обеспечивающие наибольшие интервалы на разделительных стрелках  $\Omega_{zi}(E_{\text{отц}})$

Отцеп	$Z_u$	$Z_v$	$U$			$V$			$E_{\text{отц}}$ , кВт·ч
			$h'$	$h''$	$h'''$	$h'$	$h''$	$h'''$	
1	-	-	0	0	0	0	0	0	0
2	97,103	98,564	0,220	0,765	1,200	1,064	0	1,200	0,298
	98,564	100,657	1,064	0	1,200	1,200	0	1,104	0,174
	100,657	109,220	1,200	0	1,104	1,637	0	0,800	0,298
	109,220	124,472	1,637	0	0,800	2,216	0	0,400	0,281
3	86,224	88,106	0,122	0,338	0,800	0,122	0,866	0,400	0,281
	88,106	90,503	0,122	0,866	0,400	0,122	1,200	0,148	0,264
	90,503	92,300	0,122	1,200	0,148	0,122	1,396	0	0,388
	92,300	95,154	0,122	1,396	0	0,122	1,641	0	0,371
	95,154	97,688	0,122	1,641	0	0,613	1,200	0	0,371
	97,688	101,883	0,613	1,200	0	1,200	0,674	0	0,247
	101,883	111,580	1,200	0,674	0	1,955	0	0	0,371
	111,580	157,051	1,955	0	0	1,955	0	0	0,247
4	64,200	64,359	0,378	1,106	1,200	0,378	1,106	1,200	0,298
	64,359	64,516	0,378	1,106	1,200	0,378	1,200	1,000	0,298
	64,516	65,423	0,378	1,200	1,000	0,378	1,624	0,800	0,422
	65,423	67,468	0,378	1,624	0,800	0,378	2,147	0,400	0,405
	67,468	69,652	0,378	2,147	0,400	0,378	2,400	0,208	0,388
	69,652	82,803	0,378	2,400	0,208	0,689	2,400	0	0,388
	82,803	87,291	0,689	2,400	0	0,708	2,400	0	0,371
	87,291	87,532	0,708	2,400	0	1,200	1,953	0	0,371
5	-	-	0,478	0	0	0,478	0	0	0,124

Таблица 5.7

Области эффективных режимов торможения отцепов состава, соответствующие минимальному расходу энергии замедлителями  $\Omega_{Эт}(E_{отц})$

Отцеп	$Z_u$	$Z_v$	$U$			$V$			$E_{отц},$ кВт·ч
			$h'$	$h''$	$h'''$	$h'$	$h''$	$h'''$	
1	-	-	0	0	0	0	0	0	0
2	97,103	98,5640	1,064	0	1,200	1,064	0	1,200	0,174
	98,564	100,657	1,064	0	1,200	1,200	0	1,104	
	100,657	124,472	1,200	0	1,104	1,200	0	1,104	
3	86,224	93,580	1,087	0	0,400	1,087	0	0,400	0,140
	93,580	95,172	1,087	0	0,400	1,200	0	0,323	
	95,172	157,051	1,200	0	0,323	1,200	0	0,323	
4	64,200	67,360	0,845	1,200	0,800	0,845	1,200	0,800	0,281
	67,360	69,252	0,845	1,200	0,800	1,200	0,877	0,800	
	69,252	70,397	1,200	0,877	0,800	1,200	1,200	0,553	
	70,396	74,008	1,200	1,200	0,553	1,200	1,200	0,553	
	74,008	78,741	2,169	0	0,800	2,169	0	0,800	
	78,741	84,395	2,169	0	0,800	2,400	0	0,640	
	84,395	87,532	2,400	0	0,640	2,400	0	0,640	
5	-	-	0	0	0,111	0	0	0,111	0,017

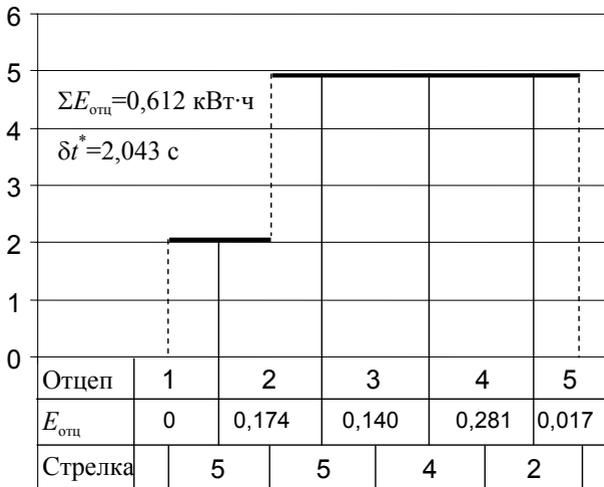


Рисунок 5.10 - Распределение интервалов между отцепами на разделительных элементах по составу при  $\Sigma E_{отц}=0,612$  кВт·ч

Увеличение интервала  $\delta t$  в неблагоприятной группе отцепов 1-2 может быть достигнуто за счет более интенсивного торможения последнего отцепа группы (отцеп 2) с помощью включения дополнительных замедлителей и увеличения расхода энергии. С этой целью для второго отцепа выделено но-

вое множество эффективных режимов торможения  $\Omega_{\Sigma_2}(E_{\text{отц}_2})$ ,  $E_{\text{отц}_2}=0,264$  кВт·ч (см. табл. 5.8) и повторно выполнена оптимизация интервалов итерационным методом.

Таблица 5.8

Область эффективных режимов торможения второго отцепа  $\Omega_{\Sigma_2}(0,264)$

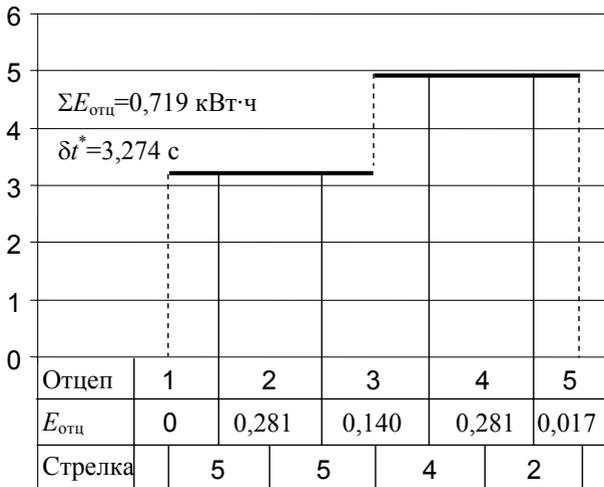
$Z_u$	$Z_v$	$U$			$V$			$E_{\text{отц}_2}$ , кВт·ч
		$h'$	$h''$	$h'''$	$h'$	$h''$	$h'''$	
97,103	98,5640	1,064	0	1,200	1,064	0	1,200	0,174
98,564	100,657	1,064	0	1,200	1,200	0	1,104	
100,657	107,145	1,200	0	1,104	1,200	0	1,104	
107,145	111,842	0,888	1,200	0,400	0,888	1,200	0,400	0,264
111,842	114,219	0,888	1,200	0,400	1,200	0,917	0,400	
114,219	123,488	1,200	0,917	0,400	1,200	1,200	0,185	
123,488	124,472	1,200	1,200	0,185	1,200	1,200	0,185	

Результаты оптимизации третьем шаге приведены в Приложении Д.5. Как видно из указанных результатов улучшение интервалов на разделительных элементах не достигнуто. Отсутствие увеличения величины интервалов может быть установлено и на основании областей эффективных режимов торможения второго отцепа  $\Omega_{\Sigma_2}(0,174)$  и  $\Omega_{\Sigma_2}(0,264)$ . В этих областях величине  $Z=\tau_1+t_3=53,836+49,655=103,491$  соответствует один и тот же режим торможения  $\mathbf{h}_2=(1,2, 0)$ . В этой связи необходимо рассмотреть следующую область эффективных режимов  $\Omega_{\Sigma_2}(E_{\text{отц}_3})$ ,  $E_{\text{отц}_3}=0,281$  кВт·ч (см. табл. 5.9).

Результаты оптимизации интервалов на третьем шаге приведены в Приложении Д.6. Графически полученный результат проиллюстрирован на рис. 5.11. Как видно, в данном случае, увеличение интервала достигается за счет выравнивания интервалов между группами 1-2 и 2-3. Учитывая, что величина минимального интервала превысила заданное значение 3 с, то полученное решение является оптимальным; оно обеспечивает максимум минимального интервала ( $\delta t=3,27$  с), которое превышает минимально допустимое значение 3 с при минимальном расходе энергии на торможение ( $\Sigma E_{\text{отц}}=0,72$  кВт·ч).

Область эффективных режимов торможения второго отцепа  $\Omega_{22}(0,281)$ 

$Z_u$	$Z_v$	$U$			$V$			$E_{отц.}$ кВт·ч
		$h'$	$H''$	$h'''$	$h'$	$h''$	$h'''$	
97,103	98,5640	1,064	0	1,200	1,064	0	1,200	0,174
98,564	100,657	1,064	0	1,200	1,200	0	1,104	
100,657	101,163	1,200	0	1,104	1,200	0	1,104	
101,163	104,915	0,313	1,200	0,800	1,200	0,395	0,800	0,281
104,915	108,868	1,200	0,395	0,800	1,200	0,917	0,400	
108,868	109,220	1,637	0	0,800	1,637	0	0,800	
109,220	124,472	1,637	0	0,800	2,216	0	0,400	



**Рисунок 5.11** - Распределение интервалов между отцепами на разделительных элементах по составу при  $\Sigma E_{отц.} = 0,719$  кВт·ч

Для оценки степени сокращения энергетических расходов при использовании разработанной методики выполнена серия вычислительных экспериментов с составом из 25 вагонов, приведенным в табл. 5.1. Результаты экспериментов показали, что энергетические расходы на регулирование скорости скатывания отцепов могут быть сокращены на 25-30%, при сохранении заданного уровня качества сортировочного процесса.

## ГЛАВА 6

### РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РОСПУСКА ПОТОКА СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

#### **6.1. Моделирование случайного потока вагонов, отцепов, составов**

Для учета влияния на процесс роспуска случайных параметров состава и отцепов перед началом роспуска выполняется статистическое моделирование их значений, а также данных о начальном состоянии путей сортировочного парка.

Первоначально моделируется назначение каждого вагона состава, анализ которых позволяет объединить смежные вагоны одного назначения в отцепы и определить их длину.

Далее моделируется тип вагона и его весовая категория (Л, ЛС, С, СТ, Т) по заданным частотам появления соответствующих вагонов в составах. Полученные данные о весовой категории используются для определения веса вагона; с этой целью предварительно моделируется нагрузка на ось вагона как случайная величина, равномерно распределенная в диапазоне нагрузок  $[q_{\text{вmin}}, q_{\text{вmax}}]$ , соответствующих данной весовой категории.

В заключение моделируется удельное основное сопротивление вагона  $w_0$ , которое рассматривается как случайная величина с параметрами, зависящими от его весовой категории. Сопротивление многовагонных отцепов определяется как средневзвешенное значение сопротивлений отдельных его вагонов.

В заключение осуществляется моделирование начального распределения вагонов по сортировочным путям; эти данные используются для определения длины свободной части сортировочных путей перед роспуском очередного состава.

### 6.1.1. Моделирование длины и назначения отцепов

В работе использован метод моделирования, который позволяет одновременно определять назначение каждого вагона состава и число вагонов в его отцепе. Метод базируется на представлении случайного числа вагонов в отцепе  $m_{\text{отц}}$  с помощью геометрического распределения, что соответствует характеру потока отцепов на действующих горках [70, 75].

Метод основан на поочередном моделировании назначений  $m_c$  вагонов состава, из которых на втором этапе формируются длинные отцепы ( $m_{\text{отц}} > 1$ ), если смежные вагоны следуют на одно назначение. В указанном методе назначения двух смежных вагонов рассматриваются как зависимые случайные события. Пусть некоторый вагон имеет назначение на  $i$ -й путь (случайное событие  $B_i$ ); при этом следующий вагон может следовать на любой из  $M$  путей сортировочного парка. Тогда возможные назначения этого вагона можно рассматривать как случайные события  $A_1, A_2, \dots, A_M$ , которые образуют полную группу несовместных событий. Обозначим вероятность  $p$  того, что следующий вагон имеет то же назначение, что и предыдущий, как условную вероятность события  $A_i$ , вычисленную при условии, что имело место событие  $B_i$ ,  $p = P(A_i|B_i)$ . Тогда вероятность  $1-p$  того, что следующий вагон имеет другое назначение, можно представить как вероятность суммы событий  $1-p = P(\sum_{j \neq i} A_j)$ . Поскольку события  $A_j, j=1, \dots, M$  несовместны, можно записать  $P(\sum_{j \neq i} A_j) = \sum_{j \neq i} P(A_j|B_i)$ ; при этом очевидно, что  $P(A_i|B_i) + \sum_{j \neq i} P(A_j|B_i) = 1$ .

Условные вероятности событий  $A_j, j=1, \dots, M$  определяются при условии, что имело место событие  $B_i, i=1, \dots, M$ . Указанные вероятности  $P(A_j|B_i)$  могут быть получены для реальной горки путем статической обработки достаточно большого числа натуральных или сортировочных листов расформированных составов.

Для первых вагонов составов вместо условных вероятностей  $P(A_j|B_i)$

используют безусловные вероятности их следования на пути сортировочного парка  $P(A_j)$ .

Найденные таким образом вероятности для моделирования удобно записать в виде прямоугольной матрицы  $(M+1) \times M$ :

$$P = \begin{bmatrix} P_{01} & P_{02} & \dots & P_{0j} & \dots & P_{0M} \\ P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{iM} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{M1} & P_{M2} & \dots & P_{Mj} & \dots & P_{MM} \end{bmatrix}$$

В данной матрице приняты обозначения  $P_{ij} = P(A_j | B_i)$ , т.е.  $P_{ij}$  есть вероятность того, что очередной вагон следует на путь  $j$  (событие  $A_j$ ), вычисленную при условии, что предыдущий вагон имеет назначение на путь  $i$  (событие  $B_i$ ). При этом для моделирования назначения очередного вагона состава (кроме первого) выбирается  $i$ -я строка матрицы, если предыдущий вагон следовал на  $i$ -й путь. Для первого вагона состава всегда выбирается нулевая строка матрицы.

Очевидно, что величины вероятностей  $P_{11}, P_{22}, \dots, P_{MM}$  характеризуют число длинных отцепов ( $m_{\text{отц}} > 1$ ), следующих соответственно на пути  $1, 2, \dots, M$ , в их общем потоке.

Следует заметить, что данный метод моделирования позволяет учесть не только реальные характеристики распределения отцепов по путям сортировочного парка и длину отцепов, но и существующие связи между назначениями смежных отцепов а также закономерности их чередования в составах.

### *6.1.2. Моделирование параметров отцепов*

Как показывает статистический анализ, параметры отдельных вагонов (тип, вес), входящих в длинные отцепы ( $m_{\text{отц}} > 1$ ), нельзя рассматривать как независимые случайные величины. Действительно, вероятность появления в

составе однородного отцепа, состоящего из  $m_{\text{отц}}$  вагонов одного типа с близким весом, значительно выше величины  $p^n$ , где  $p$  – вероятность появления одного такого вагона. Указанное явление можно объяснить наличием достаточно большого числа случаев массовой погрузки на грузовых пунктах определенного груза в адрес одной станции, который следует затем одной группой вагонов. В этой связи все отцепы можно разделить на две категории – однородные и неоднородные, вероятности появления которых ( $p_o, p_n=1-p_o$ ) могут быть получены по данным анализа размеченных натуральных листов. Тогда, если отцеп длинный ( $m_{\text{отц}} > 1$ ), то, прежде всего, моделируется его категория ( $\eta_o=0$  – однородный,  $\eta_o=1$  – неоднородный). После этого выполняется моделирование параметров каждого вагона отцепа (тип вагона и его вес); если же  $\eta_o=0$ , то параметры всех вагонов отцепа принимаются одинаковыми.

В процессе моделирования первую очередь определяется тип и число осей вагона, для чего используются статистические данные о частоте появления вагонов разного типа. Далее моделируется весовая категория вагона (Л, ЛС, С, СТ, Т) по заданным частотам появления вагонов соответствующей весовой категории:  $P_L, P_{ЛС}, P_C, P_{СТ}, P_T$ . Для определения веса вагона моделируется нагрузка на ось  $q_v$  как случайная величина, равномерно распределенная в диапазоне нагрузок, соответствующих данной весовой категории  $[q_{v\text{min}}, q_{v\text{max}}]$ .

Последним моделируется основное удельное сопротивление вагона  $w_o$ ,

[4]

$$w_o = -\frac{1}{b} \ln \prod_{j=1}^a R_j,$$

где  $a, b$  – параметры распределения случайной величины  $w_o$ ;

$R_j$  – случайные числа, равномерно распределенные в интервале  $[0, 1]$ .

Параметры  $a, b$  принимаются в зависимости от весовой категории вагона [4].

Сопротивление  $w_o$  длинного отцепа ( $m_{\text{отц}} > 1$ ) определяется как средне-

взвешенное значение сопротивлений отдельных вагонов.

### 6.1.3. Моделирование заполнения сортировочных путей перед роспуском состава

В процессе моделирования параметров состава ведется учет распределения вагонов по путям сортировочного парка; указанные данные используются при моделировании длины свободной части сортировочных путей перед роспуском.

Случайное значение координаты точки прицеливания  $s_{\text{прц}}$  на сортировочном пути перед роспуском состава можно определить как

$$s_{\text{прц}} = s_{\text{вых}}''' + \sum l_{\text{отц}} + l_{\text{св}},$$

где  $s_{\text{вых}}'''$  – координата конца ПТП на данном пути;

$\sum l_{\text{отц}}$  – суммарная длина отцепов состава, следующих на данный путь;

$l_{\text{св}}$  – случайное значение длины свободной части сортировочного пути после роспуска.

Случайная длина свободной части сортировочного пути  $L_{\text{св}}$  в соответствии с исследованиями [71] подчиняется закону Эрланга с параметром  $k=2$ ; тогда ее случайные значения  $l_{\text{св}}$  могут быть получены как:

$$l_{\text{св}} = M[L_{\text{св}}] \cdot \xi, \quad l_{\text{св}} \leq L_{\text{пол}} - \sum l_{\text{отц}}, \quad (6.1)$$

где  $M[L_{\text{св}}]$  – математическое ожидание длины свободного участка пути после роспуска;

$\xi$  – случайное число, распределенное по закону Эрланга с параметрами  $M[\xi]=1, k=2$ .

Значения  $l_{\text{св}}$  случайной величины  $L_{\text{св}}$  должны быть ограничены для того, чтобы точка  $s_{\text{прц}}$  находилась в пределах полезной длины пути  $L_{\text{пол}}$ .

Математическое ожидание  $M[L_{\text{св}}]$  может быть найдено исходя из следующих соображений. Если при роспуске состава вагоны поступают на свободный путь, то, очевидно, что  $l_{\text{св}} < L_{\text{пол}} - \sum l_{\text{отц}}$ . Обозначим вероятность такого

события как  $p_{св}$ . Тогда очевидно, что с вероятностью  $1-p_{св}$  вагоны поступают на занятый путь; при этом длина свободной части пути  $l_{св}$  будет меньше, чем в первом случае. При таких условиях вероятность данного события можно представить как

$$P(l_{св} < L_{пол} - \sum l_{отц}) = 1 - p_{св}.$$

С другой стороны, левая часть данного выражения по определению представляет собой функцию распределения  $F(l_{св})$  случайной величины  $L_{св}$  длины свободной части сортировочного пути, которая для закона Эрланга с параметром  $k=2$  может быть представлена как

$$F(l_{св}) = 1 - e^{-\frac{2l_{св}}{M[L_{св}]}} \left( 1 + \frac{2l_{св}}{M[L_{св}]} \right).$$

Тогда, приняв  $F(l) = 1 - p_{св}$ , после преобразований получим

$$p_{св} = e^{-\frac{2l_{св}}{M[L_{св}]}} \left( 1 + \frac{2l_{св}}{M[L_{св}]} \right).$$

Из данного выражения можно найти значение математического ожидания  $M[L_{св}]$ , которое затем используется для статистического моделирования отдельных значений  $l_{свi}$  случайной длины свободной части сортировочных путей с помощью (6.1). При этом, если в результате моделирования получено значение  $l_{свi} \geq L_{пол} - \sum l_{отц}$ , то в этом случае считается, что соответствующий путь свободен и принимается  $l_{свi} = L_{пол} - \sum l_{отц}$ .

Вероятность  $p_{св}$  свободности сортировочного пути перед роспуском состава может быть определена по статистическим данным наблюдений за работой горки. Приближенно величину указанной вероятности можно найти как

$$p_{св} = \frac{\bar{m}_{гп}}{m_c},$$

где  $\bar{m}_{гп}$  – средняя величина группы вагонов в составе, следующей на данный путь.

## 6.2. Модель сортировочной горки

### 6.2.1. Геометрическая модель плана путевого развития (ГМПР)

Геометрическая модель построена на основе взвешенных графов и отображает состав элементов сортировочного комплекса (участки путей, стрелочные переводы, замедлители, сигналы, концы путей и изолированные стыки), их взаимное расположение, взаимосвязь, геометрические размеры и состояние [76–78].

Структура ГМПР представлена с помощью ориентированного графа  $G(V, E)$ , в котором выделено пять подмножеств вершин:  $V^S, V^C, V^W, V^Z, V^P$ . Вершины  $v_i \in V^S$  являются центрами стрелочных переводов (ЦП), вершины  $v_j \in V^C$  – светофорами (СВ), вершины  $v_l \in V^W$  – концами путей (КП), вершины  $v_k \in V^Z$  – стыками путевых участков (СТ), вершины  $v_n \in V^P$  – точками перелома продольного профиля. Для разделения множества вершин графа  $G$  на подмножества, каждому из них выделены непересекающиеся группы номеров:  $N^S = \{1, 2, \dots, 99\}$ ,  $N^C = \{101, 102, \dots, 199\}$ ,  $N^W = \{201, 202, \dots, 299\}$ ,  $N^Z = \{301, 302, \dots, 999\}$ ,  $N^P = \{1001, 1002, \dots, 1099\}$ . Дугам графа  $e \in E$  поставлены в соответствие участки путей между отдельными вершинами.

Ориентированный граф  $G$  в памяти ЭВМ представляется списком дуг. При этом каждая дуга орграфа  $e = (v \rightarrow u)$  обозначается упорядоченной парой вершин, где  $v$  – начальная, а  $u$  конечная вершина; при этом принято, что все дуги ориентированы слева направо.

Орграф  $G(V, E)$  является взвешенным. Каждой вершине  $v_i$  подмножества  $V^S$  поставлен в соответствие вектор параметров:

$$\mathbf{X}^S = (st, e_1, e_2, e_3, e_4, \mathbf{r}),$$

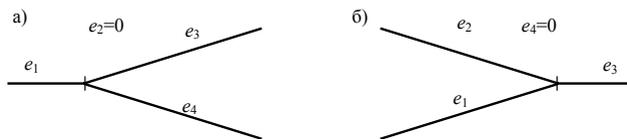
где  $st$  – положение стрелки;

$e_1 - e_4$  – путевые участки, входящие в состав стрелочного перевода;

$\mathbf{r}$  – список путевых секций входящих в изолированный участок стрелочного перевода.

Параметр  $e_2$  (или  $e_4$ ) соответствует правому пути стрелочного перевода (см. рис. 6.1). При этом используется только один из них в зависимости от

направления укладки стрелочного перевода (пошерстный или противощерстный); другой параметр принимает нулевое значение. Такое представление стрелочного перевода позволяет контролировать его занятость и определять направление движения отцепов по противощерстному переводу.



**Рисунок 6.1** - Схема кодирования стрелочных переводов: *a* – противощерстный перевод; *б* – пошерстный перевод;

Для вершин  $v_j \in V^C$  (СВ) должно быть задано направление сигнала (разрешает проследование слева направо  $dr=0$ , разрешает проследование справа налево  $dr=1$ ):

$$\mathbf{X}^C = (dr).$$

Каждая вершина  $v_n$  подмножества  $V^P$  характеризуется вектором параметров:

$$\mathbf{X}^P = (i_n, R_n),$$

где  $i_n$  – уклон элемента продольного профиля, находящаяся справа от вершины угла поворота вертикальной кривой, ‰;

$R_n$  – радиус вертикальной кривой, м;

Вершины  $v_l \in V^W$  (КП) и  $v_k \in V^Z$  (стыки) используются только для указания границ путевых участков и дополнительных параметров не имеют.

Каждой дуге орграфа  $e \in E$  поставлен в соответствие вектор параметров

$$\mathbf{Y} = (l, w_{ck}, w_3, N_n, P_1, P_2, ),$$

где  $l$  – длина участка пути, м;

$w_{ck}$  – удельное сопротивление стрелок и кривых на участке пути;

$w_3$  – удельное тормозное сопротивление замедлителей на участке пути;

$N_n$  – номер пути в соответствии с принятой на станции нумерацией;

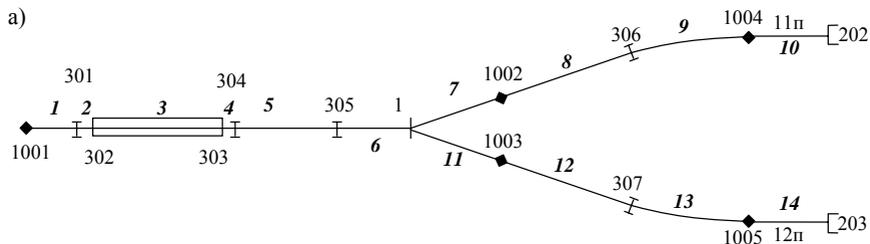
$P_1, P_2$  – идентификаторы работ, которые должны выполняться, соответственно, при занятии и освобождении путевого участка.

Последние три параметра являются необязательными и указываются при необходимости.

Дополнительно в ГМПР описываются тормозные замедлители. При этом каждый из замедлителей представляется структурой:

$$Z=(T, p, st, e),$$

- где  $T$  – тип тормозного замедлителя;  
 $p$  – номер тормозной позиции к которой относится тормозной замедлитель;  
 $st$  – состояние замедлителя;  
 $e$  – список номеров путевых участков, соответствующих замедлителю.  
 Пример ГМПП представлен на рис. 6.2.



б)

Вершины								Дуги																
ЦП								$e$	$v$	$u$	$l$	$w_{ск}$	$N_{п}$	$P_1$										
$v$	$st$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$r_1$	$r_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
1	0	6	0	7	11	5	6	1001	301	302	302	303	304	305	1	1002	306	1004	1	1003	307	1005	203	
КП																								
$v$																								
201																								
202																								
203																								
Стыки																								
$v$																								
301																								
302																								
303																								
304																								
305																								
306																								
307																								
Переломы профиля								Замедлители																
$v$	$i_{п}$	$R$						№	$T$	$p$	$e_1$													
1001	7	0						1	КНП	1	3													
1002	2	250						Примечание: Работа 1 соответствует																
1003	2	250						расцепке состава																
1004	0.6	250																						
1005	0.6	250																						

**Рисунок 6.2** - Геометрическая модель путевого развития системы расформирования: а – схема путевого развития; б – представление орграфа  $G(V, E)$ .

### 6.2.2. Модель продольного профиля горки

Для моделирования процесса скатывания отцепов необходимо дополнить информацию о плане путевого развития, содержащуюся в ГМПР, информацией о продольном профиле.

Одним из наиболее совершенных способов представления продольного профиля сортировочной горки является его аппроксимация с помощью модифицированного кубического сплайна [72]. Непрерывная аппроксимация продольного профиля, дает возможность использовать численные методы решения дифференциального уравнения скатывания отцепов. Кроме того, она позволяет повысить точность вычисления уклонов по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией профиля.

Задача аппроксимации продольного профиля горки ставится следующим образом: заданы значения отметок профиля горки  $h(s_1), \dots, h(s_n)$  в точках  $s_1 < \dots < s_n$ . Необходимо построить интерполяционную сплайн-функцию  $f$  степени  $m$  с точками соединения (узлами)  $s_1, \dots, s_n$ , которая на отрезке  $[s_i, s_{i+1}]$  имеет непрерывные производные до  $m-1$  включительно и на каждом из интервалов  $[s_i, s_{i+1}]$  представляется многочленом степени  $m$ , т.е.  $f=P_i(s)$ . Каждый многочлен  $P_i$  должен удовлетворять условиям:

$$P_i(s_i)=h(s_i), P_i(s_{i+1})=h(s_{i+1}),$$

$$P_i'(s_i)=K_i, P_i'(s_{i+1})=K_{i+1}, i=1, \dots, n-1,$$

где  $K_1, \dots, K_n$  – свободные параметры – угловые коэффициенты касательных.

Учитывая, что при моделировании скатывания отцепов, отметки точек переломов  $h(s)$  не используются, интерес представляют лишь угловые коэффициенты касательных. Для того, чтобы обеспечить постоянные значения уклонов на прямолинейных отрезках, необходимо выполнить модификацию сплайна. В результате модификации достигается то, что на участках, соответствующих прямолинейным отрезкам продольного профиля, угловые коэффициенты принимают значения  $K_{1,i}=i, K_{2,i}=0, K_{3,i}=0$ . Для представления указанной информации в модели горки структура данных, описывающих дуги ори-

ентированного графа, дополняются параметром  $K_{1,i}$ . Вертикальные кривые аппроксимируются квадратичными парабололами коэффициенты  $K_{2,i}$  и  $K_{3,i}$  которых принимает ненулевое значение. В этой связи вершинам подмножества  $v_n \in V^P$  в соответствие ставятся параметры  $K_{1,i}$ ,  $K_{2,i}$  и  $K_{3,i}$ . Числовые значения этих параметров могут быть установлены на основании уклонов  $i_1, i_2$ , поставленных в соответствие дугам, смежным данной вершине и радиуса вертикальной кривой  $R_v$ .

В соответствии с [73] коэффициенты сплайна в пределах круговых кривых могут быть получены на основании списка точек  $P_j = \{x_j, y_j\}$ ,  $j=1, n$  с помощью выражений:

$$K_{1,j} = \phi_{1,j}$$

$$K_{2,j} = 2(\phi_{1,j} - \phi_{2,j} + \phi_{3,j}) / \tau_{x,j};$$

$$K_{3,j} = \frac{\phi_{3,j}}{6\tau_{x,j}^2}$$

здесь

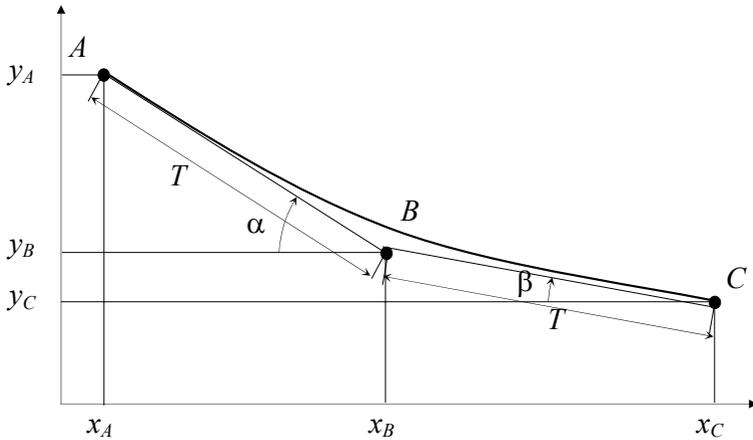
$$\tau_{x,j} = x_{j+2} - x_j;$$

$$\phi_{1,j} = (y_{j+1} - y_j) / (x_{j+1} - x_j);$$

$$\phi_{2,j} = (y_{j+2} - y_j) / \tau_{x,j};$$

$$\phi_{3,j} = \phi_{1,j} + \phi_{1,j+1} - 2\phi_{2,j}.$$

В случае, когда выполняется аппроксимация круговой кривой выполняется на основании трех точек, выражения, приведенные выше, могут быть упрощены. Расчетная схема для определения коэффициентов представлена на рис. 6.3.



**Рисунок 6.3** - Расчетная схема для определения коэффициентов сплайна в пределах круговых кривых

$$\phi_{1,j} = i_{1,j} / 1000 \quad (6.2)$$

$$\alpha = \text{atan } \phi_{1,j}, \quad \beta = \text{atan } \phi_{1,j+1} \quad (6.3)$$

$$T = R_b (\phi_{1,j} - \phi_{1,j+1}) / 2 \quad (6.4)$$

$$\tau_x = T (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (6.5)$$

$$\phi_2 = \frac{T \sin \alpha + T \sin \beta}{\tau_x} = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\cos \alpha + \cos \beta} \quad (6.6)$$

Величина уклона в пределах вертикальной кривой определяется по формуле:

$$i(x) = K_1 - K_2 x - \frac{K_3}{2} x^2$$

где  $x$  – абсциса точки в которой определяется уклон,  $x=0$  соответствует началу кривой.

Таким образом, для дуги  $e=(v \rightarrow u)$  уклон в некоторой точке находящейся на расстоянии  $L$  от ее начала определяется из выражения:

$$i(L) = \begin{cases} K_{v1} - K_{v2}x_v - \frac{K_{v3}}{2}x_v^2, & x_v = T_v \cos(\arctg K_{v1}) + L \cos(\arctg i(e)) \text{ при } L < T_v \\ i(e), & \text{при } T_v \leq L \leq l(e) - T_u \\ K_{u1} - K_{u2}x_u - \frac{K_{u3}}{2}x_u^2, & x_u = (L - l(e) + T_u) \cos K_{u1} \end{cases}$$

Для примера рассмотрим вертикальную кривую радиуса  $R_v=200$  м, сопрягающую элементы профиля уклоном 20‰ и 7‰. В соответствии с выражениями (6.2)-(6.6)  $T=1,3$  м;  $K_1=0,02$ ;  $K_2=0,0050019$ ,  $K_3=2,8 \cdot 10^{-8}$ . Тогда в точке  $A$ , находящейся на расстоянии  $T$  влево от вершины угла поворота вертикальной кривой ( $x_A=0$ ) уклон составляет 20‰. В точке  $B$ , соответствующей вершине угла поворота вертикальной кривой ( $x_B=T \cos \alpha=1,29974$ ) уклон составляет 13,5‰. В точке  $C$ , находящейся на расстоянии  $T$  вправо от вершины угла поворота вертикальной кривой ( $x_C=T(\cos \alpha + \cos \beta)=2,59971$ ) уклон составляет 7‰.

Указанное представление продольного профиля позволяет получать непрерывные поверхности скатывания по любому из маршрутов скатывания, при этом на общих участках маршрутов профиль является идентичным.

### 6.2.3. Модель занятия путевых участков подвижным составом (МЗП)

МЗП позволяет контролировать занятие каждого путевого участка подвижным составом и определять идентификаторы объектов (локомотивов, составов, отцепов), находящихся на данном участке.

Для реализации МЗП используется динамически обновляемый список, каждый из элементов которого является структурой

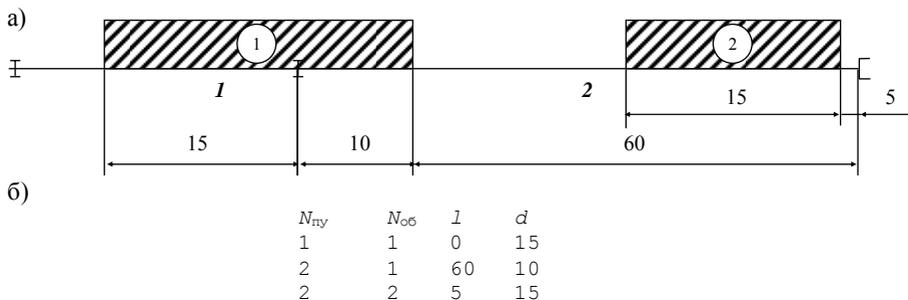
$$\mathbf{Q}=(N_{пу}, N_{об}, l, d), \quad (6.7)$$

где  $N_{пу}$ ,  $N_{об}$  – соответственно, номер занятого путевого участка и идентификатор находящегося на нем объекта.

$l$  – расстояние от правого конца объекта до конца путевого участка (в соответствии с принятой ориентацией графа), м.

$d$  – расстояние, занятое объектом  $N_{об}$  на путевом участке  $N_{пу}$ , м.

Так на рис. 6.4, а показано размещение двух объектов длиной 25 и 15 м на двух путевых участках; на рис. 6.4, б приведен список структур  $\mathbf{Q}$  для представления данной ситуации в МЗП.



**Рисунок 6.4** - Фрагмент модели занятия путей: *а* – схема занятия путей; *б* – представление модели занятия путей в виде списка.

Обновление МЗП осуществляется при добавлении и удалении объектов из МЗП (готовность состава к расформированию, уборка состава из сортировочного парка и т.п.), а также в дискретные моменты системного времени в случае их перемещения.

### 6.3. Модели объектов подвижного состава

В процессе расформирования принимают участие разнообразные объекты подвижного состава (надвигаемые составы, скатывающиеся отцепы, вагоны, находящиеся на сортировочных путях). Для представления указанных объектов имитационная модель процесса расформирования содержит модели объектов подвижного состава. Модель подвижного состава представляет собой совокупность сведений, необходимых для имитации надвига, регулируемого скатывания и накопления вагонов при принятом способе описания движения и модели сортировочной горки. Элементарной единицей при этом является модель вагона, в которой каждый вагон представлен с помощью структур:

$$C = (c_T, c_x, \chi, o, v, w_{пн}, Y),$$

где  $c_T, c_x$  – идентификаторы вагонов, связанных с данным;

$\chi$  – категория объекта (состав, отцеп и т.п.);

$o$  – идентификатор соответствующего объекта  $N_{об}$  в МЗП (6.7);

$v$  – скорость вагона;

$w_{пн}$  – номер сортировочного пути назначения вагона;

$\mathbf{Y}$  – вектор параметров вагона  $\mathbf{Y}=(t, Q_b, b, w_0)$

$t$  – идентификатор типа вагона;

$Q_b$  – вес вагона;

$b$  – тип подшипников;

$w_0$  – основное удельное сопротивление движению вагона.

Каждый тип вагона представлен структурой:

$$\mathbf{T}=(l_b, \mathbf{A}, \mathbf{C}_x),$$

$l_b$  – длина вагона;

$\mathbf{A}$  – осевая модель вагона;

$\mathbf{C}_x$  – вектор коэффициентов для определения сопротивления среды и ветра.

Модели состава и скатывающихся отцепов представляют собой двусвязные списки вагонов, объединяемые с помощью параметров  $c_r$  и  $c_x$ . В МЗП составы и отцепы рассматриваются как единый объект, длина которого равна длине всех входящих в него вагонов. Начальные параметры вагонов моделируются

#### 6.4. Моделирование перемещения объектов

Целью моделирования перемещения объектов подвижного состава является определение значений их скорости  $v$  и координаты  $s$ , в конце шага  $\Delta t$ .

Для имитации перемещения состава и отцепов на каждом шаге  $\Delta t$  используются уравнения движения, в которых в качестве независимой переменной выбрано время. Перемещение состава моделируется упрощенно как равноускоренное:

$$v_{i+1} = v_i + a_i \Delta t; \quad \Delta s_{i,i+1} = v_i \Delta t + \frac{a_i \Delta t^2}{2}.$$

При этом, после пересечения вершины горки, каждом шаге  $\Delta t$  контролируется отрыв очередного отцепа в составе.

Перемещение отцепа на шаге  $\Delta t$  описывается дифференциальным

уравнением второго порядка

$$s'' = \frac{d^2 s}{dt^2} = g'(i - w_o - w_{ck} - w_{cb} - w_T) \cdot 10^{-3}, \quad (6.8)$$

при начальных условиях  $s(t_j) = s_j$  и  $s'(t_j) = v_j$ .

Для решения дифференциального уравнения (6.8) используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка, позволяющий найти координату отцепа  $s_{j+1}$  и его скорость  $v_{j+1}$  в момент  $t_{j+1} = t_j + \Delta t$  [74].

В отдельных случаях, когда отцеп на шаге  $\Delta t$  проходит через выделенные точки на плане горки (стрелки, замедлители и др.), его приходится разбивать на части. При этом расстояние, проходимое отцепом за время  $\Delta t$ , делится на  $(k+1)$  шаг:

$$\Delta s(\Delta t) = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots + \Delta s_{k+1}.$$

Значение  $k$  определяется числом выделенных точек, через которые проходят оси отцепа за время  $\Delta t$ . При этом шаги  $\Delta s_1, \dots, \Delta s_k$  выбираются так, чтобы после перемещения отцепа на  $\Delta s_i$  соответствующая ось попала в точку  $s_i$ ; последний шаг  $\Delta s_{k+1}$  определяется так, чтобы общее время прохождения всех  $(k+1)$  шагов равнялось  $\Delta t$ .

На шагах  $\Delta s_1, \dots, \Delta s_k$  перемещение отцепа моделируется с помощью дифференциального уравнения первого порядка (2.29), в котором независимой переменной является путь. Значение времени  $\Delta t_i$  на отдельном шаге  $\Delta s_i$  определяется по средней скорости отцепа.

На последнем  $(k+1)$ -м шаге перемещение отцепа моделируется с помощью уравнения (6.8); при этом величина шага  $\Delta t_{k+1}$  определяется как

$$\Delta t_{k+1} = \Delta t - \sum_{i=1}^k \Delta t_i.$$

В случае, когда на некотором шаге фиксируется соударение и объединение отцепов, осуществляется корректирование их моделей:

- изменяются идентификаторы  $c_x$  и  $c_r$ , соответственно, хвостового вагона в первом объекте и головного вагона во втором;

- второй объект исключается из МЗП, а список занятых участков корректируется в соответствии с увеличенной длиной первого объекта;
- корректируется скорость движения отцепа.

Расчет скорости объединенного отцепа осуществляется следующим образом. Известно, что при соединении соударяющихся отцепов часть их кинетической энергии расходуется на преодоление сил трения в поглощающих аппаратах автосцепок. В этой связи соударение отцепов при нагоне можно рассматривать как неупругое центральное лобовое соударение. В этом случае, в соответствии с законом сохранения импульса, скорость объединенного отцепа после соударения можно определить как:

$$v = \frac{v_1 Q_{отц1} + v_2 Q_{отц2}}{Q_{отц1} + Q_{отц2}}.$$

Разработанная модель позволяет имитировать движение состава на надвижной части сортировочной горки, одновременное скатывание всех отцепов на спускной части и на сортировочных путях, а также соударения отцепов и проталкивание стоящих вагонов.

### **6.5. Определение показателей функционирования горки.**

В имитационной модели расформирования составов на сортировочной горке фиксируются следующие показатели:

- количество включений замедлителей тормозных позиций  $K_{вкл}$ ;
- расход воздуха на включение замедлителей  $\Sigma P_{св}$ , м<sup>3</sup>;
- развернутая длина торможения  $\Sigma D_{тп}$ , осе-м;
- общая длина подлежащих ликвидации окон между вагонами на сортировочных путях  $\Sigma L_{ок}$ , м;
- количество операций осаживания  $K_{ос}$ ;
- количество нагонов отцепов на стрелочных переводах  $K_{н}$ .

Указанные показатели фиксируются для всей совокупности составов, расформированных за период моделирования, и используются для определения расходов в денежном выражении, связанных с роспуском составов.

Расходы, связанные с торможением вагонов, могут быть определены следующим образом:

$$\mathcal{E}_T = c_{эл} \varepsilon_{св} \Sigma P_{св} + e_{вкл} K_{вкл} + e_{рв} \Sigma D_{тп},$$

где  $c_{эл}$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, грн;

$\varepsilon_{св}$  – удельный расход электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> свободного воздуха;

$e_{вкл}$  – расходная ставка на одно включение замедлителя, грн;

$e_{рв}$  – расходная ставка на 1 осе-м торможения, грн.

Расходы на маневровую работу по осаживанию вагонов на сортировочных путях для ликвидации окон:

$$\mathcal{E}_{ос} = e_{лч} \left( K_{ос} \frac{t_3}{60} + \frac{\Sigma L_{ок}}{1000 v_{ос}} \right),$$

где  $e_{лч}$  – расходы на 1 час маневровой работы, грн;

$t_3$  – продолжительность полурейса заезда локомотива на сортировочный путь, мин;

$v_{ос}$  – скорость осаживания вагонов на сортировочном пути, км/ч.

Расходы на выполнение маневровой работы по ликвидации последствий вагонов отцепов:

$$\mathcal{E}_н = e_{лч} K_n \frac{t_{нр}}{60},$$

где  $t_{нр}$  – продолжительность рейса локомотива по перестановке вагонов в связи с неразделением отцепов, мин.

Кроме указанных экономических показателей по результатам моделирования определяются параметры, характеризующие качество функционирования сортировочной горки: распределение интервалов  $\delta t$  между отцепами на разделительных элементах; вероятность неразделения отцепов  $P_n$ ; распределение скоростей соударения  $v_{сод}$  на сортировочных путях; распределение

длин окон  $L_{ок}$  (первичных и после проталкивания); средняя длина окна  $\lambda$  на один переработанный вагон; средний расход воздуха замедлителями  $\rho$  на один переработанный вагон.

Указанные показатели могут использоваться для анализа работы горок с целью совершенствования их конструкции [79], разработки энергосберегающих технологий роспуска составов и совершенствования процесса поездообразования в сортировочных парках [80].

## ВЫВОДЫ

В данной монографии представлено новое решение актуальной научно-технической проблемы совершенствования режимов торможения отцепов расформируемого состава с целью сокращения расходов энергоресурсов. Разработанный итерационный метод оптимизации режимов торможения отцепов позволяет минимизировать затраты электроэнергии на включение замедлителей в процессе роспуска состава и в то же время обеспечить требуемое качество интервального регулирования скорости отцепов, а также безопасную скорость соударения вагонов на сортировочных путях.

Основные научные результаты и выводы работы заключаются в следующем:

1. Выполненный анализ научных работ по поставленной проблеме показал, что существующие в настоящее время методы управления процессом роспуска составов развиты недостаточно. Они не ставят целью сокращение расходов энергии на торможение вагонов замедлителями и в то же время не обеспечивают необходимое качество интервального регулирования скорости скатывающихся отцепов. Не решена задача теоретической оценки минимальных затрат энергии, необходимой для роспуска составов; указанная оценка необходима для определения потенциальных возможностей сортировочных горок. Известные методы оптимизации режимов роспуска составов обладают существенными недостатками и не ориентированы на реализацию энергосберегающих технологий.

Существующие имитационные модели, используемые для теоретических исследований процесса скатывания отцепов, нуждаются в совершенствовании, с тем чтобы более детально учитывать процесс взаимодействия замедлителей разного типа с вагонами, а также определять расходы электроэнергии для торможения отцепов.

2. Выполнена формализация и разработана имитационная модель процесса торможения отцепов вагонными замедлителями с учетом их парамет-

ров, принципа действия, ступени торможения, характеристик вагонов отцепа. Созданная модель позволяет варьировать координаты положения отцепа в моменты начала и окончания торможения (модель с регулируемой зоной торможения). Установлено, что заданная скорость выхода отцепа из тормозной позиции или погашаемая энергетической высота могут быть реализованы при различном выборе зоны торможения. При этом указанный выбор существенно влияет на показатели процессов торможения и скатывания отцепов: длину зоны торможения, развернутую длину торможения отцепа, количество используемых замедлителей, продолжительность скатывания отцепа. Эти показатели существенно влияют на энергетические расходы, связанные с торможением вагонов на горках, и должны учитываться при исследованиях и разработке энергосберегающих технологий расформирования составов.

3. Получены новые результаты, характеризующие область допустимых режимов торможения и ее связь с параметрами отцепа и условиями скатывания.

3.1. Ограничения режимов торможения отцепов определяются тормозной мощностью замедлителей, допустимыми скоростями их движения на спускной части горки и требованиями прицельного регулирования. Предельные значения энергетической высоты  $h'$ , погашаемой на ВТП, представляются определенными числовыми значениями, а на СТП – линейными зависимостями, связывающими величину  $h''$  с  $h'$ ; указанные ограничения определяются допустимыми скоростями выхода отцепа из ВТП и СТП.

3.2. Область допустимых режимов торможения образуется совокупностью активных ограничений энергетической высоты, погашаемой на ВТП и СТП, и представляет собой выпуклый многоугольник с числом сторон от 3 до 6. Число сторон уменьшается с ростом сопротивления движению отцепов; при достаточно большом сопротивлении ОДР может вырождаться в точку.

3.3. Основными параметрами ОДР, характеризующими ее размеры и положение, являются ширина ОДР и расстояние от ее нижней границы до

начала координат. Ширина ОДР определяется расстоянием между линиями, соответствующими предельным значениям скорости выхода отцепа из СТП и пропорциональна разности квадратов этих скоростей.

3.4. С увеличением сопротивления движению отцепа и/или дальности его скатывания ОДР смещается к началу координат, что соответствует уменьшению его торможения на ВТП и СТП; при этом ширина ОДР изменяется незначительно. При возрастании указанных величин до критических для данных горки и условий скатывания значений, минимальная величина энергетической высоты, которая должна быть погашена на СТП, уменьшается до нуля, а ОДР превращается в треугольник. При дальнейшем росте сопротивления и/или дальности скатывания отцепа ширина ОДР начинает резко уменьшаться и, наконец, достигает нуля; при этом для достижения точки прицеливания отцеп должен скатываться без торможения на ВТП и СТП.

3.5. Характер изменения параметров ОДР существенно зависит от уклона сортировочного пути. При ускоряющем уклоне ОДР может вообще не существовать; это означает, что не существует режимов торможения, при которых скорость отцепа в точке прицеливания не превысит допустимую величину.

3.6. Выбор режима торможения в ОДР оказывает влияние на общую энергетическую высоту, погашаемую всеми тормозными позициями на пути скатывания отцепа, и, следовательно, на расход энергии для торможения. При быстром режиме скатывания эта высота минимальна, при медленном режиме – максимальна. Разность указанных величин возрастает с ростом сопротивления движению отцепа и потребной дальности его скатывания.

3.7. Расходы на торможение отцепов на горке зависят не непосредственно от суммарной погашаемой энергетической высоты, а от числа включений замедлителей при регулировании скорости их скатывания. Энергоемкость отдельных режимов торможения, принадлежащих ОДР, можно характеризовать с помощью диаграммы числа замедлителей, используемых для реализации этих режимов.

4. Установлены закономерности интервального регулирования скорости отцепов на горках.

4.1 Лучшими для отцепа являются такие режимы торможения, при которых интервалы на стрелках разделения со смежными отцепами одинаковы. Обычно существует множество таких режимов; они образуют линию режимов с равными интервалами.

4.2 Значения интервалов монотонно возрастают при движении вдоль линии равных интервалов и достигают максимума на границе ОДР. Направление роста зависит от соотношения координат стрелок разделения смежных пар отцепов. Если координата точки входа отцепа на стрелку разделения первой пары меньше координаты точки его выхода со стрелки разделения второй пары, то максимальные интервалы располагаются на нижнем участке границы ОДР; в противном случае они располагаются на ее верхнем участке. Максимальное изменение величины интервалов вдоль линии пропорционально разности координат указанных точек.

4.3 Линия режимов торможения с равными интервалами может и не принадлежать ОДР; при этом возникают противоречия между требованиями интервального и прицельного регулирования скорости отцепов. В этом случае определяется область режимов торможения, допустимых по условиям интервального регулирования, в которой все интервалы на стрелках превышают минимально допустимую величину. Ограничения области устанавливаются на основе анализа скалярного поля минимальных интервалов на стрелках разделения отцепов расчетной группы. Аналогичные ограничения определяются по условиям обеспечения минимальных интервалов между отцепами на входных замедлителях ВТП и СТП.

4.4. Выполнена оценка влияния режимов торможения крайних отцепов расчетной группы на условия их разделения на стрелках. Установлено, что положение линии равных интервалов однозначно определяется числовым параметром, связанным с режимами торможения крайних отцепов.

5. Установлена взаимосвязь между интервалами на разделительных элементах и расходами электроэнергии на торможение отцепа. Полученные результаты позволяют выделить в ОДР область эффективных режимов торможения и существенно сократить время поиска оптимального режима.

6. Формализована двухкритериальная задача оптимизации режимов торможения отцепов состава. Предложен алгоритм поиска оптимального режима торможения на базе разработанного итерационного метода оптимизации. Анализ результатов оптимизации показывает, что использование разработанной методики позволяет сократить расходы электроэнергии, связанные с торможением отцепов при роспуске состава, на 25%-30% при сохранении требуемого уровня качества сортировочного процесса.

7. Разработана имитационная модель роспуска потока составов на сортировочных горках.

7.1. Для получения случайного потока расформируемых составов и их отцепов используется статистическое моделирование параметров отдельных вагонов, а также состояния сортировочных путей перед роспуском состава.

7.2. Модель путевого развития содержит данные о плане, продольном профиле разделительных стрелках и замедлителях горки, а также данные о занятии путевых участков объектами подвижного состава. Для представления плана путевого развития используется взвешенный ориентированный граф. Продольный профиль горки аппроксимирован модифицированными кубическими сплайнами.

7.3. Для моделирования управляемого скатывания отцепов состава на спускной части горки используются полученные предварительно данные об оптимальных режимах торможения каждого отцепа. Для моделирования процесса заполнения сортировочных путей осуществляется имитация движения по ним поступающих отцепов, а также нагонов, соударений, объединения и проталкивания стоящих вагонов.

7.4. В процессе моделирования фиксируются показатели работы горки, которые используются для определения расходов, связанных с роспуском со-

ставов (расходы на торможение отцепов, а также на маневровую работу по осаживанию вагонов на сортировочных путях и по ликвидации последствий неразделения отцепов на стрелках). Кроме указанных экономических показателей по результатам моделирования определяются параметры, характеризующие качество функционирования сортировочной горки. Указанные показатели могут использоваться для анализа работы горок с целью совершенствования их конструкции и разработки энергосберегающих технологий роспуска составов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Про енергозбереження: Закон України від 1 липня 1994 р. №74/94-ВР // Відомості Верховної Ради України. – 1994. №30 283 с.
2. Про порядок нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві: Постанова КМУ від 15 липня 1997 р. №786 // Офіційний вісник України. – 1997. №30 с. 36-40.
3. Концепція та програма реструктуризації на залізничному транспорті України. - К.: НАБЛА, 1998. - 145 с.
4. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207 - 89. - М.: Транспорт, 1992. - 104 с.
5. Пособие по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств // Ю.А. Муха, Л.Б. Тишков, В.П. Шейкин и др. – М.: Транспорт, 1994. – 220 с.
6. А.Н. Огарь. Методика оптимизации значений уклонов элементов продольного профиля сортировочных горок // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте, 2001. №3 с. 18 – 22.
7. Муха Ю. А., Бобровский В.И. Исследование влияния высоты сортировочной горки на качество прицельного регулирования. // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Труды ДИИТа, вып. 168/9. Днепропетровск, 1975. – с. 39-54
8. Кривошей Б. А., Пестременко А. З. Техничко-експлуатаційні параметри сортировочной горки. // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Сб. научн. тр. – Вып. 194/11. – Днепропетровск: ДИИТ, 1977. –с. 39-46
9. Божко Н. П. Оптимизация конструкции продольного профиля сортировочной горки. // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках: Межвуз. сб. научн. тр. – Днепропетровск: ДИИТ, 1986. –с. 13-25
10. Берестов І. В., Похилко С. П. Розроблення методики визначення

енерговитрат гіркових електровозів при насуві та розпуску составів на гірках. // Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України. Збірник наукових праць.– Вип. 62. – Харків, 2004. –с. 10-19

11. Бутько Т.В., Чеклов В.Ф. Прогнозування паливно-енергетичних витрат при розформуванні составів на сортувальних гірках. // Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України. Збірник наукових праць.– Вип. 62. – Харків, 2004. –с. 60-66

12. Гончаров Н.Е. Повышение качества и эффективности управления транспортными средствами. – К.: “Будівельник”, 1976. – 152 с

13. Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, А.Н. Прогонный. Электромагнитный замедлитель-ускоритель для систем автоматического регулирования скорости роспуска на сортировочных горках // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте, 1998. №1 с. 39 – 42.

14. Р.Ш. Ягудин. Программа обновления и развития средств автоматизации и механизации сортировочных станций и горок на период 2000 – 2005 гг. // Автоматика, связь, информатика, 2000. №8 с. 47 – 48.

15. В.М. Кайнов. Программа обновления и развития технических средств сортировочных станций и горок // Автоматика, связь, информатика, 2001. №1 с. 2–5.

16. В.А. Кобзев. Анализ технических средств и технологий регулирования скорости отцепов // Автоматика, телемеханика и связь, 1998. №1 с. 27 – 29.

17. В.А. Кобзев. Горочникам ресурсосберегающую технику и технологию // Автоматика, телемеханика и связь, 1997. №11 с. 34 – 36.

18. В.А. Кобзев. Ресурсосбережение в технологии эксплуатации и ремонта тормозной горочной техники//Автоматика, телемеханика и связь, 1998. №12 с.31, 32.

19. В.А. Кобзев. Новый вагонный замедлитель КЗ-5 для сортировочных горок // Автоматика, связь, информатика, 2000. №11 с. 8 – 10.

20. В.П. Шейкин. Снижение расхода энергоресурсов для торможения вагонов на сортировочных горках // Вестник ВНИИЖТ, 1996. №3, с. 24 – 27.

21. Современные вагонные замедлители // Железные дороги мира, 1998. №3 с. 49-51

22. В.Д. Моргачев и др. Создание эффективных электромагнитных вагозамедлителей // Автоматика, телемеханика и связь, 1991. №9 с. 6 – 7.

23. Е.В. Нагорный, В.И. Мороз и др. Разработка конструкции вагонного замедлителя для систем АРС на сортировочных горках // Залізничний транспорт України, 1998. №4-5 с. 31 – 33.

24. В.А. Кобзев. Вагонные замедлители // Железнодорожный транспорт, 2001. №11, с. 64-67.

25. А.Н. Нечипоренко, Ю.В. Колосов. Опытная эксплуатация неуправляемых домкратовидных вагонных замедлителей // Автоматика, телемеханика и связь, 1995. №6 с. 12-14.

26. В.П. Шейкин. Влияние способов управления вагонными замедлителями на расход энергоресурсов // Вестник ВНИИЖТ, 1981. №5, с. 15 – 17.

27. Е.В. Нагорный, А.Я. Шейнин. Решение задачи по энергосбережению при торможении отцепов на сортировочных горках // Залізничний транспорт України, 1998. №1 (4-5) с. 70–72.

28. Ульянычев Ю.В. АРС ГТСС. Автоматическое регулирование скорости вагонов на сортировочной горке. // Автоматика, телемеханика и связь.–1972.–№ 7.–с. 10-14

29. Фонарев Н.М. Автоматизация процесса расформирования составов на сортировочных горках.–М. : Транспорт, 1971.

30. Е.Н. Лебединская, Н.Н. Новгородов, Л.В. Пальчик, Е.Г. Шепилова, А.А. Явна. Разработка адаптивной автоматической системы управления работой сортировочной горки // Вестник ВНИИЖТ, 1999. №3 с. 32 – 34.

31. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях / Ю.А. Муха, И.В. Харланович, В.П. Шейкин и др. – М.: Транспорт, 1985. – 248 с.

32. Муха Ю.А., Бобровский В.И. Исследование точности прицельного регулирования на сортировочных горках, оборудованных системами APC. // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Труды ДИИТа, вып. 168/9. Днепропетровск, 1975. –с. 55-64

33. Муха Ю.А., Бобровский В.И., Яневич В.З., Бледный А.М. Участие горочных операторов в управлении сортировочным процессом на автоматизированных сортировочных горках. // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Труды ДИИТа, вып. 181/10. Днепропетровск, 1976. –с. 41-56

34. Бледный А.М., Бобровский В.И. Экспериментальная оценка качества интервального и прицельного регулирования скорости движения отцепов на сортировочной горке, оборудованной системой APC ГТСС. // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 229/15. – Днепропетровск: ДИИТ, 1983. –с. 48-59

35. Механизация и автоматизация формирования поездов./ Ю.А. Муха, В.А. Король, Н.М. Иванков и др.; Под общ. Ред. Ю.А. Мухи. – К.: Техніка, 1987.

36. Буянова В.К. Моделирование на ЭЦВМ процесса роспуска вагонов с сортировочной горки. Вестник ЦНИИ МПС, 1965, № 6

37. Муха Ю.А., Бобровский В.И. Алгоритмы и библиотека программ для моделирования на ЭВМ «Наири-К» сортировочного процесса на горках. Труды ДИИТа, вып. 194/11. Днепропетровск, 1977

38. Муха Ю. А., Муратов А. А. Имитационное моделирование процесса скатывания отцепов при выполнении горочных расчетов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ, 1990. - с. 11 - 20

39. Иванченко В.Н., Лябах Н.Н., Сепетый А.А. Новый подход к управлению процессом роспуска составов на сортировочной горке. Труды РИИЖ-Та, Ростов-на Дону: 1984. - с. 34 - 41

40. В.Ф. Маркин. К высокому уровню автоматизации горочных процессов // Автоматика, телемеханика и связь, 1996. №1 с. 29 – 30.

41. А.Г. Савицкий. Концепция автоматизации и механизации процессов на сортировочных станциях // Автоматика, связь, информатика, 2000. №4 с. 49 – 52.

42. В.В. Захаренко, Н.А. Никифоров. Новое поколение микропроцессорной техники на сортировочной горке // Автоматика, связь, информатика, 2000. №12 с. 15–17.

43. П.А. Козлов. Курс – на комплексную автоматизацию сортировочных станций // Автоматика, связь, информатика, 2001. №1 с. 6 – 9.

44. А.Н. Шабельников. Системы автоматизированных сортировочных горок на базе промышленных компьютеров // Автоматика, связь, информатика, 2001. №11 с. 13 – 16.

45. Лебединская Е.Н., Шепилова Е.Г. Математическая модель программы роспуска составов с сортировочной горки. //Междунар. сб. научн. тр. Ростов н/Д. РГУПС, 1998. с.31-37

46. И.В. Жуковицкий, Г.И. Загарий, Н.И. Луханин. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 1. Модель системы // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте, 2000. №5 с. 10 – 15.

47. И.В. Жуковицкий. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 2. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте, 2002. №4 с. 17 – 20.

48. Божко Н.П. Моделирование работы тормозных позиций на сортировочной горке. // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр., Вып. 197/12. Днепропетровск, ДИИТ, 1977. –с. 73-87

49. В.И. Шелухин, И.Н. Малышев, Д.А. Милехин. Прицельное торможение на базе адаптивных алгоритмов // Автоматика, связь, информатика, 2000. №2 с. 9 – 11.

50. Шелухин В.И., Малышев И.Н. Универсальный модуль управления тормозными позициями. // Автоматика, связь, информатика, 2000. №5. с. 12-14.

51. Кроуцилек Р., Леман З. Новые методы управления вагонными замедлителями. // Железные дороги мира, 1980. №12, с. 13-19

52. Павлов В.Е., Доронин Ф.А. О прицельном регулировании скоростей отцепов на сортировочной горке в системе АРС. Труды ЛИИЖТа, вып. 412. –Л.: ЛИИЖТ, 1977. с. 23-34

53. Аркатов В.С., Муха Ю.А. и др. Проблема эффективности автоматизированного управления процессом расформирования составов на сортировочных горках станций. // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр., вып. 229/15. Днепропетровск, 1983. с. 3-21.

54. Муха Ю.А. Оптимизация режимов торможения скатывающихся отцепов при расформировании составов на сортировочной горке// Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Труды ДИИТа. - Вып. 181/10. - Днепропетровск. - 1976. - с. 17 - 23.

55. Божко Н.П. Методика определения режимов торможения отцепов при анализе конструкций сортировочных горок // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 229/15. – Днепропетровск: ДИИТ, 1983. – с. 30 - 36.

56. Бобровский В.И. Исследование влияния длины измерительного участка на скорость роспуска составов // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ, 1986. - с. 50 - 59

57. Бобровский В.И. Поиск оптимальных режимов торможения на проектируемых сортировочных горках // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – №5. – с. 50 - 54.

58. Бобровский В.И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках / Транспорт: 3б. науч. праць. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2000. – с. 43 - 47.

59. Бобровский В.И. Многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов роспуска составов на горках // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2004. – №2. – с. 8-14.

60. Рогинский Н.О., Родимов Б.А., Зубрилин Г.И. Механизация сортировочных горок. Москва, 1949

61. Ющенко Н.Р., Цымбалюк С.К., Третьяк Б.А. О выборе рациональной длины тормозных балок нажимных вагонных замедлителей. Труды ДИИТа, вып. 160/8. Днепропетровск, 1974

62. Цымбалюк С.К. О стабилизации тормозной характеристики однозвенного нажимного замедлителя. Труды ДИИТа, вып. 160/8. Днепропетровск, 1974

63. Установление технико-эксплуатационных характеристик замедлителей типа КНП-5, РНЗ, и КВ при торможении восьмиосных вагонов. Отчет по НИР. ДИИТ, Днепропетровск, 1983

64. Исследование влияния технико-эксплуатационных характеристик замедлителей на качество сортировочного процесса. Отчет по НИР. № гос. Рег. 78001226. ДИИТ. Днепропетровск, 1978

65. Эксплуатационные испытания и установление технико-эксплуатационных характеристик замедлителей РНЗ-2. Отчет по НИР. № гос. Рег. 018230667576. ДИИТ. Днепропетровск, 1983

66. В.П. Шейкин, В.Н. Соколов, А.Б. Демидович. О нормировании и снижении расхода энергоресурсов на сортировочных горках // Автоматика, телемеханика и связь, 1995. №7 с. 30 – 32.

67. Бобровский В.И., Козаченко Д.Н. Математическая модель для оптимизации интервального регулирования скорости отцепов на горках // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті. - 2003. – № 3. – с. 3-8.

68. Таха Х. Введение в исследование операций: В 2 - х книгах. - М.: Мир, 1985. - Кн. 1. - 479 с. - Кн. 2. - 496 с.

69. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация.—М.: Мир, 1985.—509 с.

70. Бобровский В.И. Эргатические модели сортировочных горок // Информційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2001.- №5.- с. 7 - 11.

71. Муха Ю.А., Бледный А.М., Бобровский В.И. Исследование распределения работы между тормозными позициями при регулировании скорости скатывания отцепов на автоматизированной сортировочной горке // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. - Вып. 197/12. - Днепропетровск: ДИИТ, 1978. - с. 15 - 24.

72. Бобровский В.И. Представление продольного профиля сортировочных горок в АСУ расформированием составов // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №1, 2. - с. 19 - 25.

73. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. - М.: Радио и связь, 1985. - 304 с.

74. Бобровский В.И. Дифференциальные уравнения движения отцепа и методы их решения // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №6. - с. 34 - 39.

75. Козаченко Д.М., Березовий М.І, Таранець О.І. Аналіз впливу спеціалізації сортувальних колій на показники процесу розформування составів // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006 - №6/2(24). - с 7-9.

76. Бобровский В.И., Козаченко Д.Н., Вернигора Р.В. Технико-экономическое управление железнодорожными станциями на основе эргатических моделей // Информційно- керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 6. – с. 17-21

77. Бобровський В.І., Козаченко Д.М., Вернигора Р.В. Базова модель колійного розвитку в імітаційних моделях залізничних станціях // Удосконалення вантажної і комерційної роботи на залізницях України, зб. наукових праць УкрДАЗТ, вип. 62. – 2004. - с. 20-25.

78. Козаченко Д.М. Модель колійного розвитку для імітаційного моделювання гіркових процесів // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаря на. – Вип. 29 – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. - с 53-57.

79. Козаченко Д.Н., Таранец О.И. Моделирование сортировочного процесса на горках // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт, наука, бизнес: проблемы и стратегия развития», посв. 130-летию Сверд. ж.д.: сб. научн. Тр. - Екатеринбург: УрГУПС. – 2008. - 290 с.

80. Козаченко Д.М., Вернигора Р.В., Березовий М.І. Дослідження впливу спеціалізації сортувальних колій на тривалість операцій по їх підготовці до розпуску // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаря на. – Вип. 24. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, - 2008. - с 34-37.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

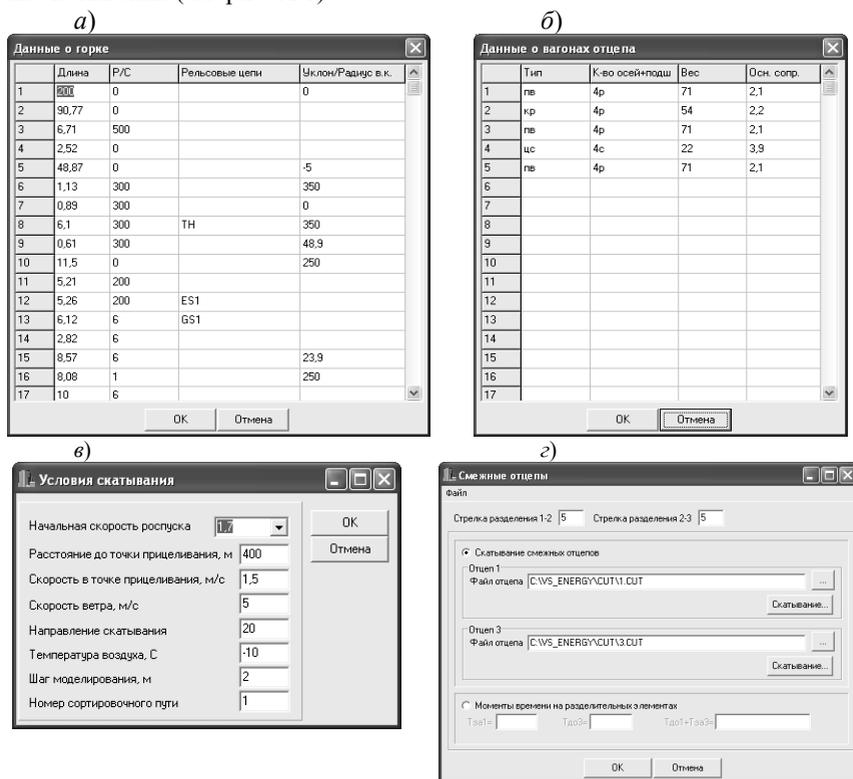
# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## ПРОГРАММА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ С ГОРКИ

Программа VS.exe предназначена для исследования процесса скатывания одиночных отцепов и расчетных групп из трех отцепов.

Программа реализована на языке Builder C++ 6.0 и предназначена для работы в OS Windows XP. Программа VS.exe позволяет выполнять следующие функции:

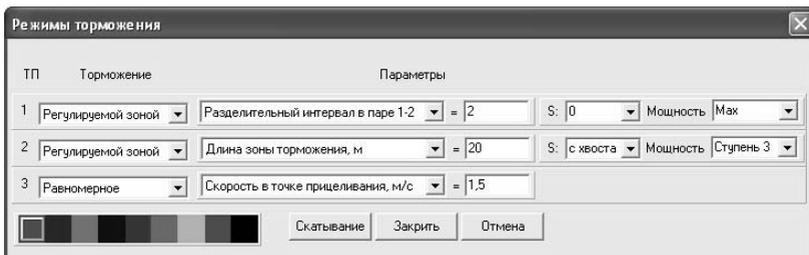
1. Ввод и редактирование исходных данных о горке, отцепе и условиях скатывания (см. рис. А.1):



**Рисунок А.1** - Диалоговые окна ввода исходных данных для моделирования: а – план и профиль горки; б – параметры отцепа; в – условия скатывания; г – условия скатывания смежных отцепов

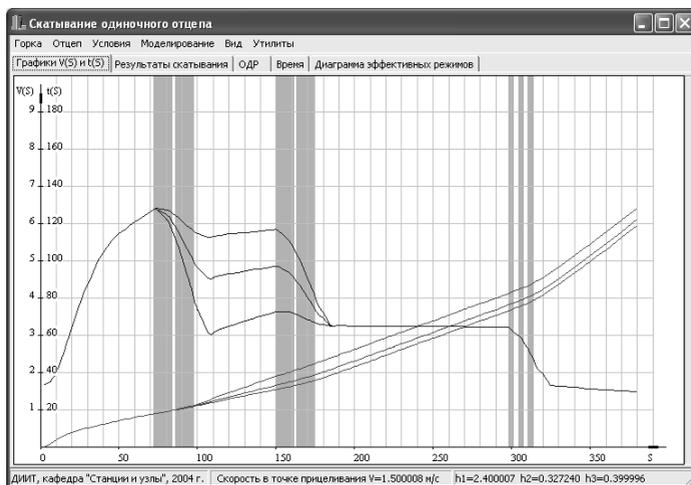
2. Ввод данных о режимах торможения при равномерном торможении и при регулируемой зоне действия тормозной позиции. Предусмотрена воз-

возможность задания для одной из тормозных позиций диапазона значений по-  
 гашаемой энергетической высоты с целью построения различных зависимо-  
 стей (см. рис. А.2):



**Рисунок А.2.** - Диалоговое окно для задания условий торможения отцепа

3. Моделирование скатывания отцепа и построение графиков скорости  $V(S)$  и времени  $T(S)$  их скатывания; предусмотрена возможность наложения графиков, полученных при различных режимах торможения (см. рис. А.3):



**Рисунок А.3** - Графики скорости и времени скатывания отцепа при различных режимах торможения на тормозных позициях

4. Ведение протоколов скатывания отцепа с указанием параметров  $S$ ,  $V$  и  $T$  в контрольных точках маршрута, работы тормозных позиций и интервалов со смежными отцепами на разделительных элементах (см. рис. А.4):

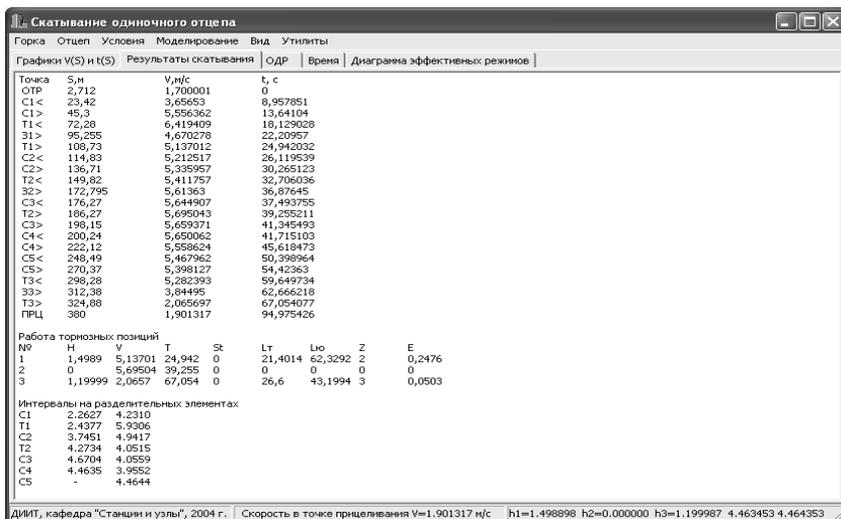


Рисунок А.4 – Результаты моделирования скатывания отцепа

5. Построение области допустимых режимов торможения отцепа и ее анализ (см. рис. А.5):

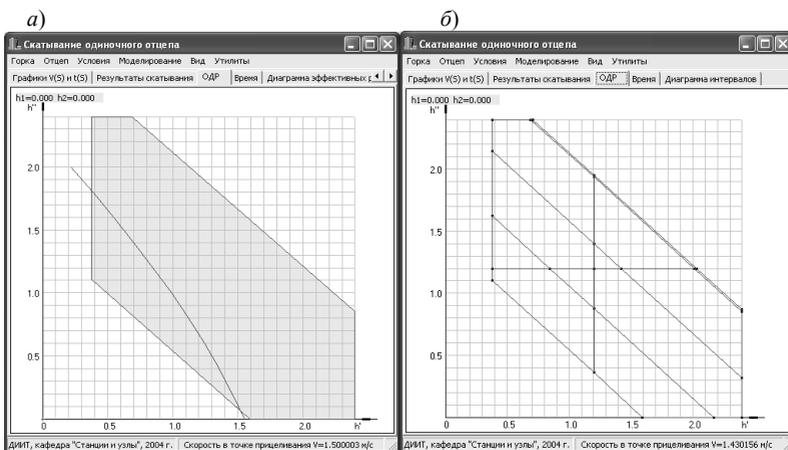


Рисунок А.5 – Область допустимых режимов торможения отцепа: а – линия равных интервалов; б – диаграмма используемых замедлителей

6. Выполнение совокупности скатываний в соответствии с пакетом заданий (см. рис. А.6):

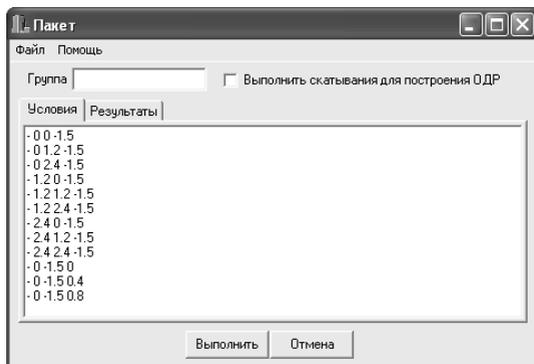


Рисунок А.6 - Диалоговое окно для формирования пакета заданий

7. Построение зависимостей интервалов между смежными отцепами группы от величины погашаемой энергетической высоты (см. рис. А.7):

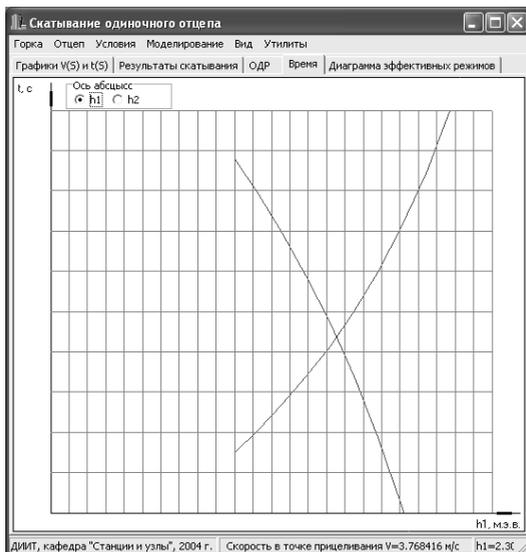


Рисунок А.7 - Зависимости интервалов  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  от погашаемой энергии на ВТП

8. Построение диаграммы эффективных режимов торможения для минимизации расхода энергии (см. рис. А.8):

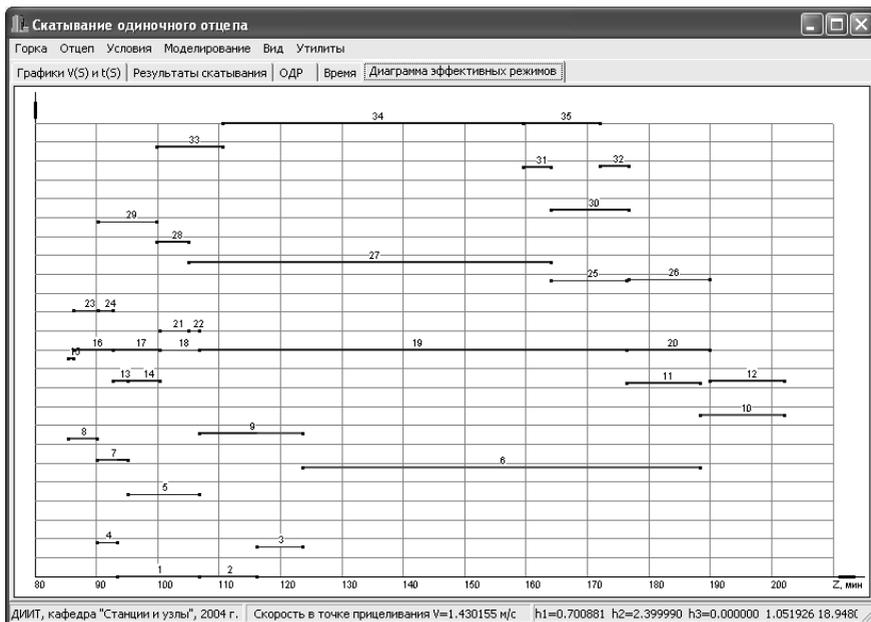


Рисунок А.8 - Диаграмма эффективных режимов торможения

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В приложении приведены параметры отцепов и условия роспуска для каждого вычислительного эксперимента, которые были выполнены с использованием имитационной модели скатывания отцепов с горки (табл. Б.1).

*Таблица Б.1*

Условия проведения экспериментов

№ опыта	Вес отцепа, $Q$ , т	Основное удельное сопротивление, $w_0$ , Н/кН	Количество вагонов в отцепе	Скорость ветра, $V_{вет}$ , м/с	Температура воздуха, °С
1	85	0,5	1	5	- 10
2				- 5	0
3	70	0,8	1	5	- 10
4				- 5	0
5	50	1,5	1	5	- 10
6				- 5	0
7	37	2,5	1	5	- 10
8				- 5	0
9	85	0,5	3	5	- 10
10				- 5	0
11	70	0,8	3	5	- 10
12				- 5	0
13	50	1,5	3	5	- 10
14				- 5	0
15	37	2,5	3	5	- 10
16				- 5	0

Скорость роспуска, а также направление ветра были приняты постоянными:

- начальная скорость отцепов  $V_0=1,7$  м/с;
- направление ветра  $\beta=20^\circ$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОДР ОТ ПОТРЕБНОЙ ДАЛЬНОСТИ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ

В данном приложении приведены результаты серии имитационных экспериментов на основании условий проведения экспериментов (см. Приложение Б, табл. Б.1), использованные для анализа изменений режимов торможения отцепов на ВТП и СТП в зависимости от потребной дальности их скатывания. Для каждого эксперимента координата точки прицеливания  $S_n$  варьировалась в пределах от 400 до 1100 м, т.е. в пределах полезной длины сортировочного пути.

В Приложении В.1 приведены значения  $R_{\min}$  и  $E$  с шагом 50 м: в табл. В.1 – результаты скатывания одиночных отцепов, в табл. В.2 – длинных (трехвагонных) отцепов.

На каждой странице Приложения В.2 для каждого опыта приведены соответствующие графики зависимости параметров ОДР от потребной дальности их скатывания  $R_{\min}(S_n)$  и  $E(S_n)$ .

Нумерация рисунков Приложения В.2 соответствует условиям проведения экспериментов (см. Приложение Б, табл. Б.1).

## В.1. Параметры ОДР для расчетных отцепов

Таблица В.1

Параметры ОДР для отцепа из одного вагона

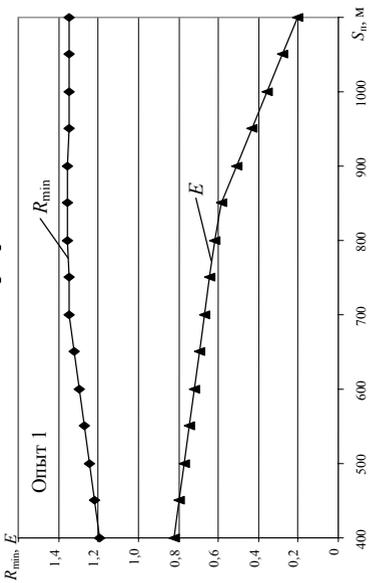
S	$w_0=0,5$ Н/кН		$w_0=0,8$ Н/кН		$w_0=1,5$ Н/кН		$w_0=2,5$ Н/кН	
	$R_{min}$	E	$R_{min}$	E	$R_{min}$	E	$R_{min}$	E
	Неблагоприятные зимние условия, $v_n=5,0$ м/с							
400	0,8183	1,1968	0,7154	1,2991	0,4688	1,3727	0	1,3979
450	0,7958	1,2193	0,6688	1,3382	0,3623	1,3731	0	1,1989
500	0,7724	1,2427	0,6202	1,3397	0,2507	1,3746	0	0,9915
550	0,7482	1,2669	0,5698	1,3424	0,1341	1,3766	0	0,7752
600	0,7231	1,2920	0,5175	1,3456	0,0127	1,3786	0	0,5499
650	0,6972	1,3180	0,4634	1,3491	0	1,2679	0	0,3154
700	0,6703	1,3448	0,4074	1,3528	0	1,1403	0	0,0717
750	0,6426	1,3496	0,3497	1,3566	0	1,0084	0	0
800	0,6142	1,3539	0,2902	1,3606	0	0,8722	–	–
850	0,5833	1,3577	0,2274	1,3642	0	0,7298	–	–
900	0,5107	1,3504	0,1206	1,3616	0	0,5330	–	–
950	0,4351	1,3482	0,0099	1,3613	0	0,3312	–	–
1000	0,3585	1,3478	0	1,2593	0	0,1255	–	–
1050	0,2808	1,3484	0	1,1461	0	0	–	–
1100	0,2018	1,3496	0	1,0311	–	–	–	–
Благоприятные летние условия, $v_n=5,0$ м/с								
400	1,0199	1,0004	0,9665	1,0544	0,8404	1,1815	0,6538	1,2434
450	1,0329	0,9874	0,9658	1,0551	0,8069	1,2151	0,5712	1,2397
500	1,0463	0,9740	0,9650	1,0559	0,7722	1,2497	0,4861	1,2379
550	1,0602	0,9601	0,9642	1,0567	0,7366	1,2533	0,3988	1,2374
600	1,0748	0,9455	0,9634	1,0575	0,7001	1,2533	0,3099	1,2378
650	1,0901	0,9302	0,9626	1,0584	0,6627	1,2539	0,2195	1,2387
700	1,1065	0,9138	0,9617	1,0592	0,6246	1,2547	0,1280	1,2401
750	1,1135	0,9068	0,9608	1,0601	0,5858	1,2556	0,0357	1,2422
800	1,1135	0,9068	0,9599	1,0610	0,5463	1,2566	0	1,1876
850	1,1135	0,9068	0,9576	1,0633	0,5049	1,2571	0	1,0956
900	1,1135	0,9068	0,9186	1,1023	0,4290	1,2490	0	0,9681
950	1,1086	0,9117	0,8784	1,1425	0,3519	1,2451	0	0,8419
1000	1,0828	0,9375	0,8385	1,1824	0,2753	1,2430	0	0,7167
1050	1,0582	0,9621	0,7988	1,2221	0,1990	1,2420	0	0,5916
1100	1,0340	0,9863	0,7592	1,2617	0,1232	1,2415	0	0,4662

Таблица В.2

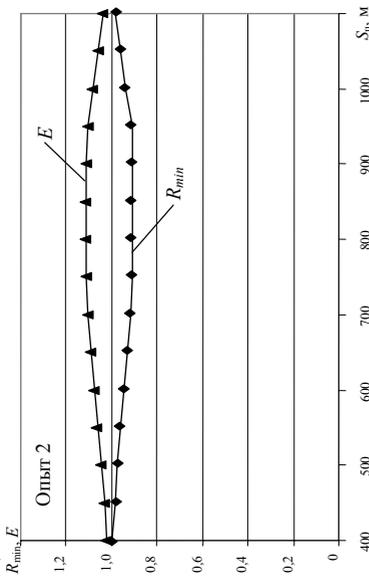
## Параметры ОДР для отцепа из трех вагонов

S	$w_0=0,5$ Н/кН		$w_0=0,8$ Н/кН		$w_0=1,5$ Н/кН		$w_0=2,5$ Н/кН	
	$R_{\min}$	E	$R_{\min}$	E	$R_{\min}$	E	$R_{\min}$	E
	Неблагоприятные зимние условия, $v_b=5,0$ м/с							
400	0,9159	1,1328	0,8333	1,2060	0,6382	1,2965	0,3058	1,3219
450	0,9049	1,1437	0,8027	1,2366	0,5601	1,2965	0,1580	1,3200
500	0,8937	1,1550	0,7712	1,2681	0,4795	1,2974	0	1,3243
550	0,8822	1,1665	0,7390	1,2808	0,3966	1,2986	0	1,1667
600	0,8704	1,1783	0,7060	1,2825	0,3115	1,3001	0	1,0050
650	0,8583	1,1904	0,6722	1,2844	0,2243	1,3018	0	0,8391
700	0,8460	1,2027	0,6377	1,2866	0,1349	1,3033	0	0,6691
750	0,8334	1,2153	0,6024	1,2888	0,0435	1,3050	0	0,4950
800	0,8205	1,2282	0,5664	1,2911	0	1,2570	0	0,3168
850	0,8070	1,2417	0,5293	1,2933	0	1,1631	0	0,1340
900	0,7671	1,2816	0,4650	1,2921	0	1,0376	0	0
950	0,7152	1,2870	0,3882	1,2912	0	0,8982	–	–
1000	0,6630	1,2855	0,3107	1,2912	0	0,7573	–	–
1050	0,6104	1,2850	0,2323	1,2917	0	0,6147	–	–
1100	0,5573	1,2851	0,1529	1,2925	0	0,4700	–	–
Благоприятные летние условия, $v_b=-5,0$ м/с								
400	1,0391	1,0263	0,9856	1,0741	0,8598	1,1861	0,6751	1,2237
450	1,0492	1,0163	0,9818	1,0779	0,8233	1,2226	0,5905	1,2213
500	1,0594	1,0060	0,9779	1,0818	0,7860	1,2257	0,5042	1,2201
550	1,0699	0,9955	0,9740	1,0857	0,7480	1,2254	0,4166	1,2196
600	1,0805	0,9849	0,9700	1,0897	0,7095	1,2255	0,3278	1,2195
650	1,0914	0,9740	0,9659	1,0938	0,6705	1,2257	0,2380	1,2197
700	1,1027	0,9627	0,9617	1,0980	0,6309	1,2261	0,1474	1,2204
750	1,1143	0,9512	0,9575	1,1022	0,5909	1,2265	0,0562	1,2215
800	1,1263	0,9391	0,9532	1,1065	0,5504	1,2270	0	1,1874
850	1,1385	0,9269	0,9485	1,1112	0,5092	1,2275	0	1,0962
900	1,1249	0,9406	0,9200	1,1397	0,4447	1,2250	0	0,9809
950	1,1005	0,9650	0,8811	1,1787	0,3700	1,2231	0	0,8567
1000	1,0766	0,9889	0,8423	1,2174	0,2955	1,2220	0	0,7329
1050	1,0530	1,0125	0,8036	1,2346	0,2211	1,2215	0	0,6091
1100	1,0295	1,0360	0,7649	1,2321	0,1468	1,2213	0	0,4850

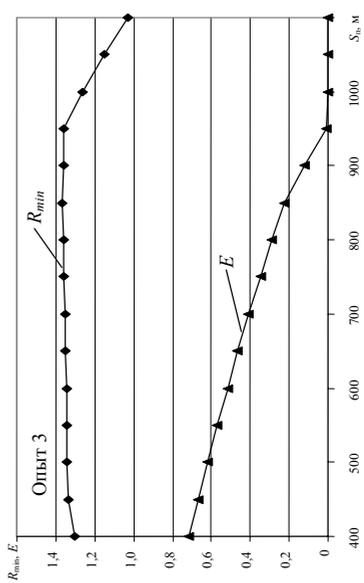
**В.2 Графики зависимости параметров ОДР от дальности их скатывания отцелов**



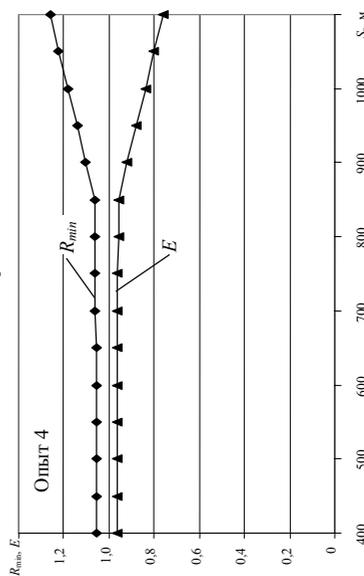
**Рисунок В.1**



**Рисунок В.2**

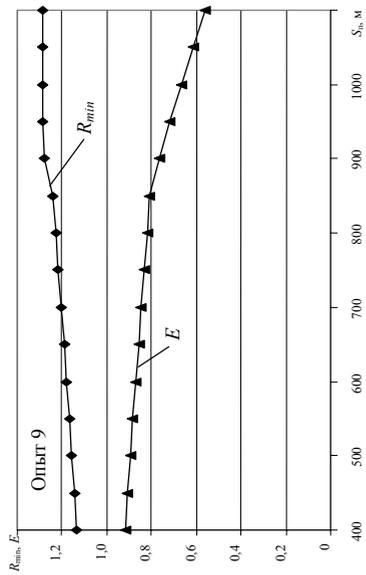


**Рисунок В.3**

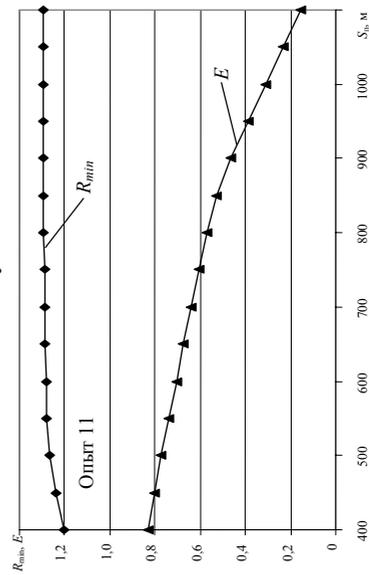


**Рисунок В.4**

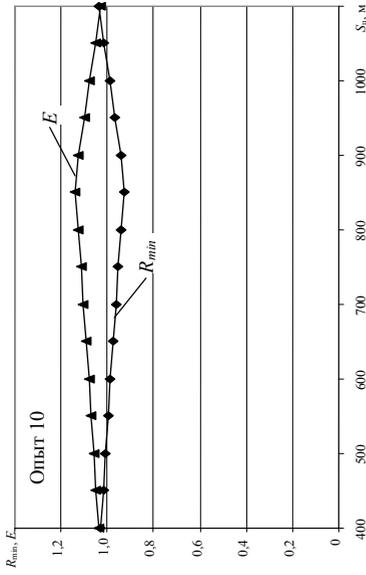




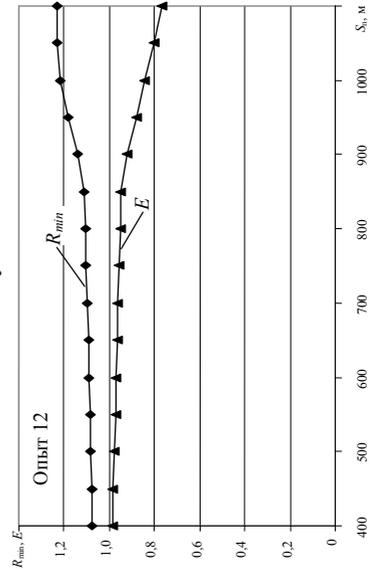
**Рисунок В.9**



**Рисунок В.11**



**Рисунок В.10**



**Рисунок В.12**

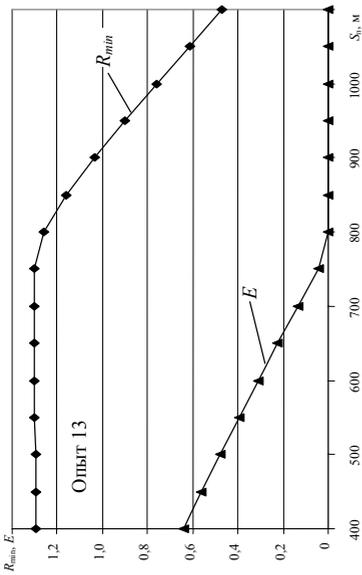


Рисунок В.13

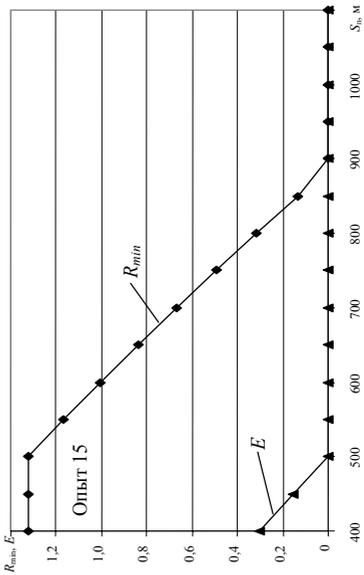
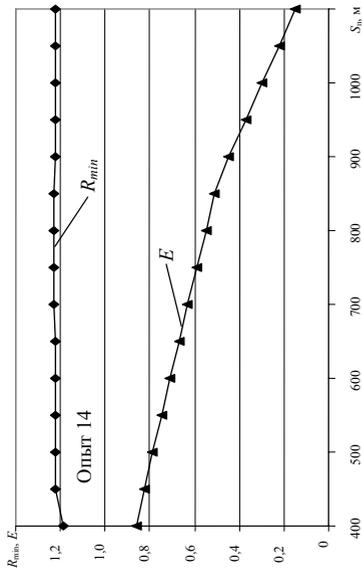


Рисунок В.15



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИЙ РЕЖИМОВ $U=H''(H')$ С РАВНЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ $\overline{\delta t}$ МЕЖДУ ОТЦЕПАМИ РАСЧЕТНОЙ ГРУППЫ

В данном Приложении приведены результаты моделирования скатывания расчётных групп, состоящих из трёх отцепов, в которых первый и третий отцепы – одиночные вагоны ОП (четырёхосные полувагоны на роликовых подшипниках с параметрами  $Q=22$  т,  $w_0=4,5$  Н/кН). В качестве среднего принимались одно- и трёхвагонные отцепы, параметры которых, а также условия скатывания принимались в соответствии с условиями проведения экспериментов (см. Приложение Б, табл. Б.1). Для учёта влияния на величину интервалов  $\overline{\delta t}$  координат стрелок разделения отдельных пар отцепов группы рассмотрены все возможные их комбинации.

По результатам моделирования построены графики режимов  $U=h''(h')$  с равными интервалами  $\overline{\delta t}$  (рис. Г.1–Г.16). На данных рисунках линия  $a$  соответствует комбинации разделительных стрелок 2-5, линия  $b$  – комбинации 5-2. Цифрами 1, 2, 3 обозначены участки границы ОДР при дальности скатывания в сортировочный парк соответственно 400, 700, 1000 м; при этом верхние участки изображены сплошными линиями, а нижние – пунктирными.

Нумерация рисунков приложения соответствует номерам отцепов и условиям проведения экспериментов (см. Приложение Б, табл. Б.1).

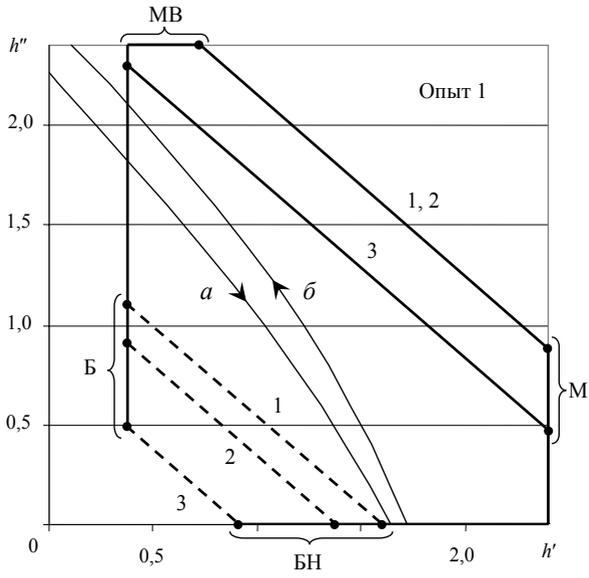


Рисунок Г.1

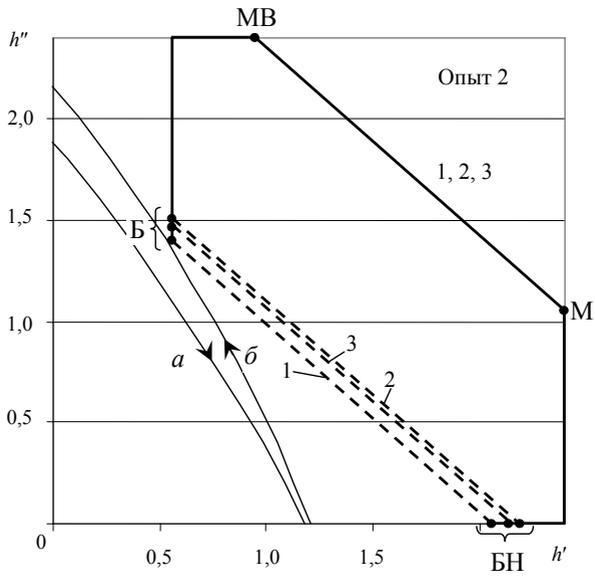


Рисунок Г.2

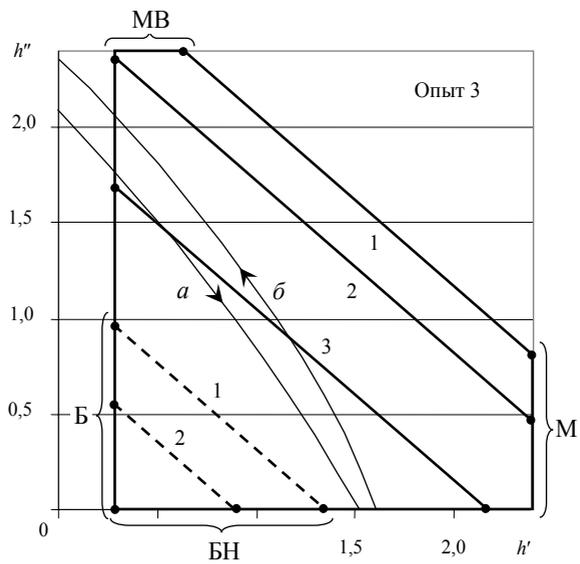


Рисунок Г.3

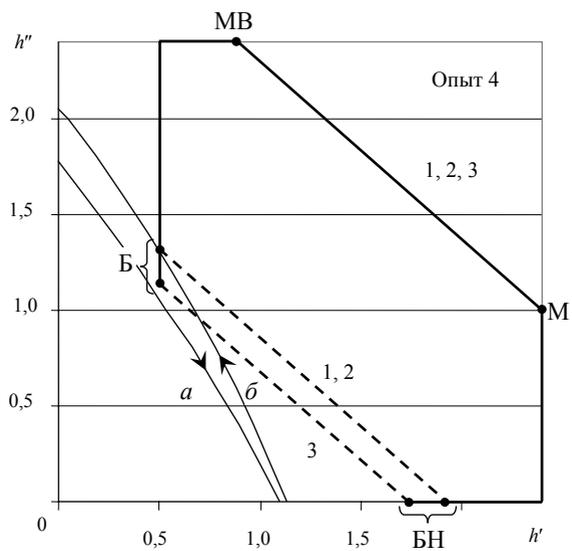
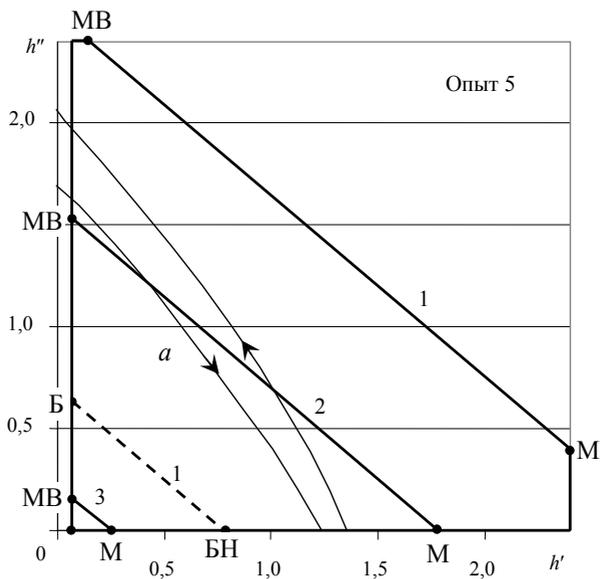
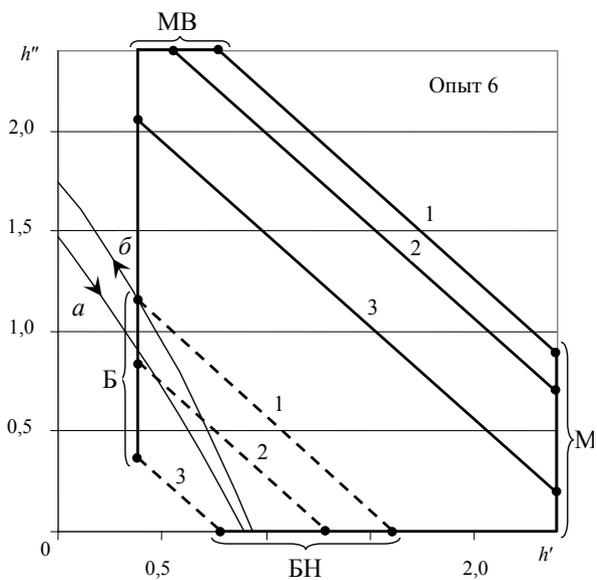


Рисунок Г.4



**Рисунок Г.5**



**Рисунок Г.6**

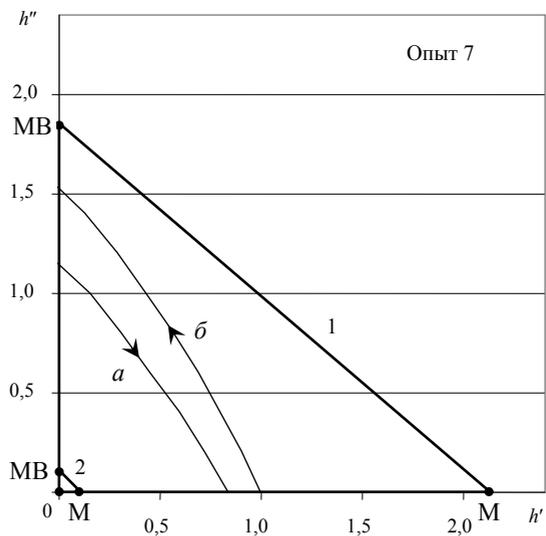


Рисунок Г.7

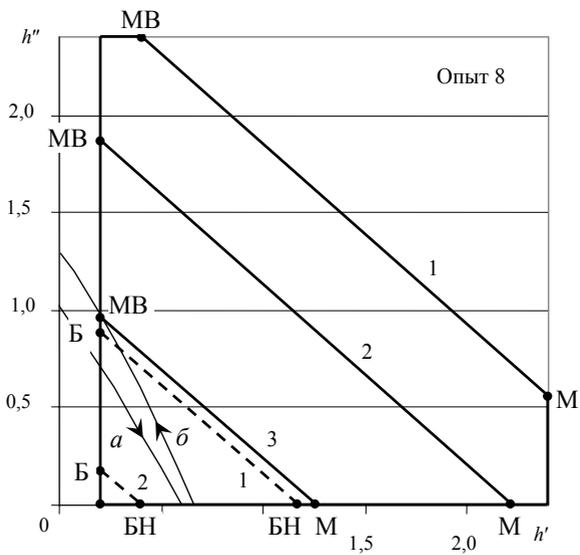


Рисунок Г.8

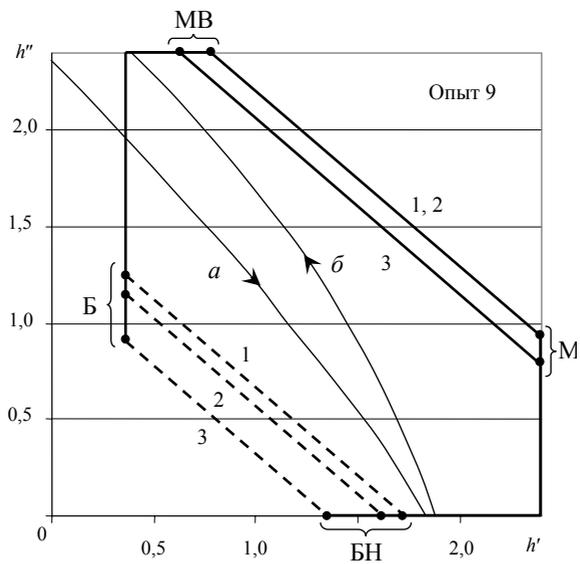


Рисунок Г.9

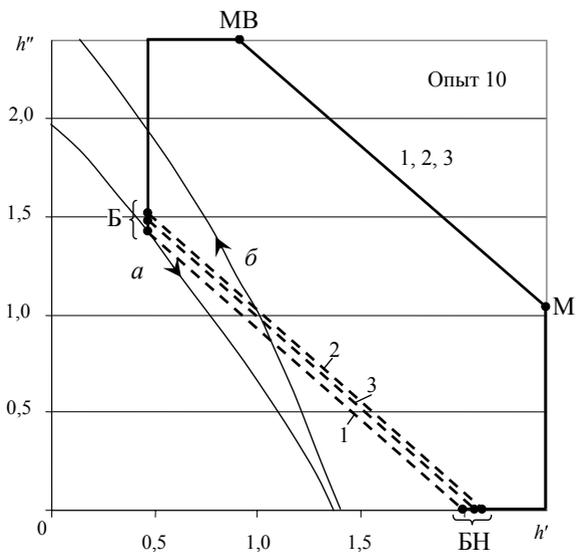


Рисунок Г.10

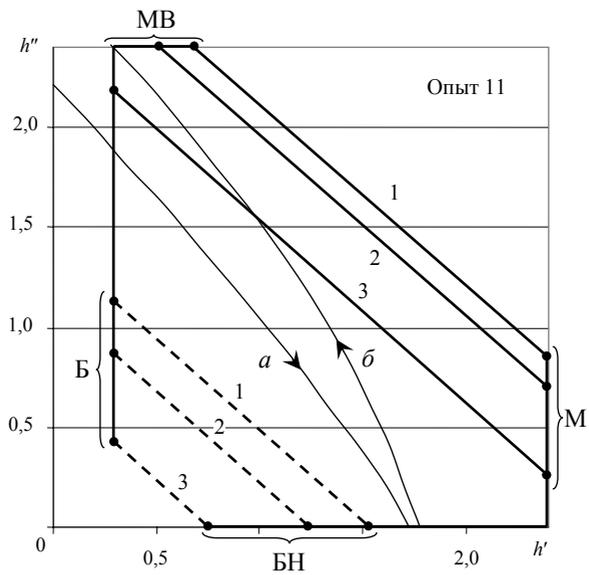


Рисунок Г.11

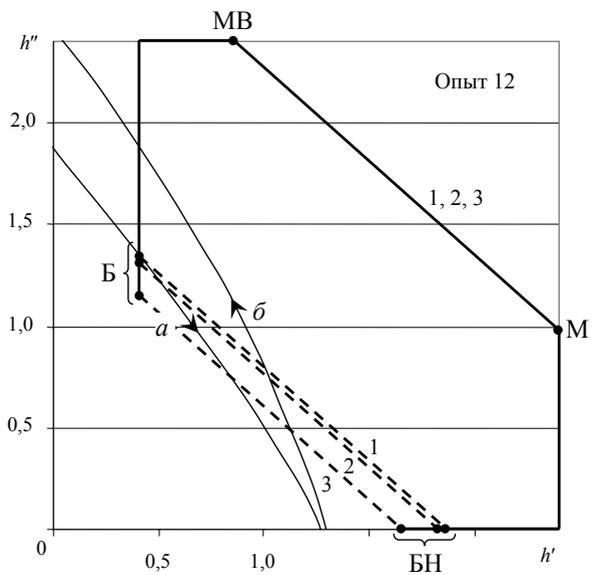


Рисунок Г.12

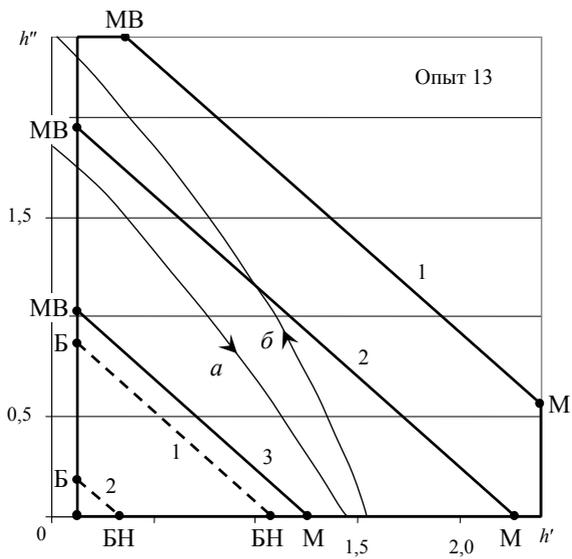


Рисунок Г.13

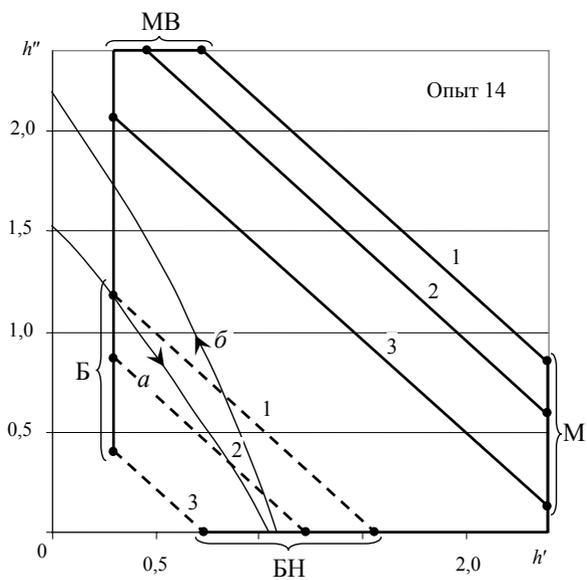


Рисунок Г.14

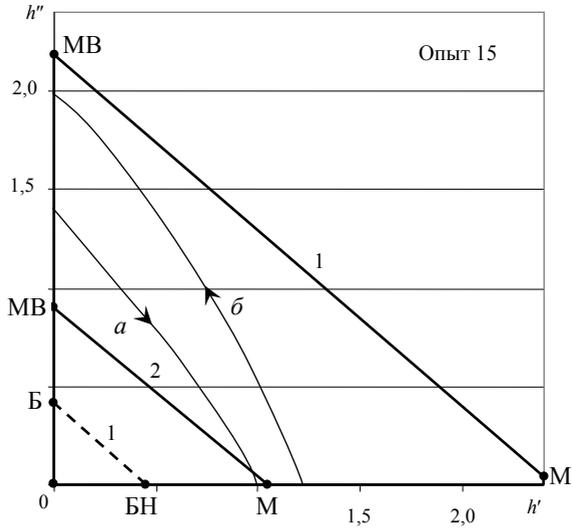


Рисунок Г.15

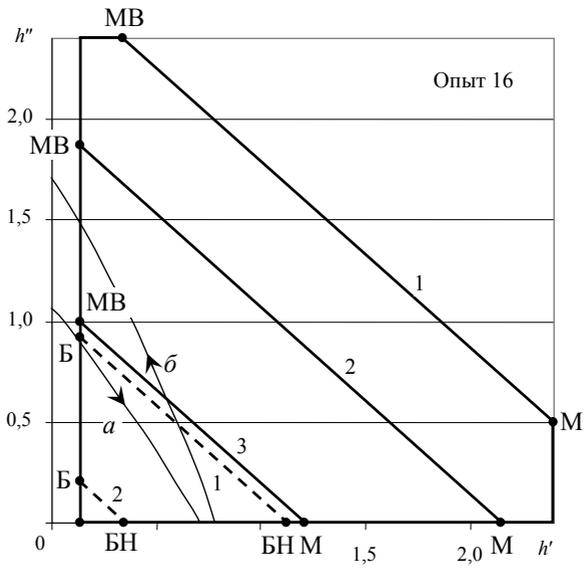


Рисунок Г.16

ПРИЛОЖЕНИЕ Д  
МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСХОДОВ НА РЕГУЛИРОВАНИЕ  
СКОРОСТИ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ

**Д.1. Файл данных о параметрах отцепов состава из 5 одиночных вагонов**

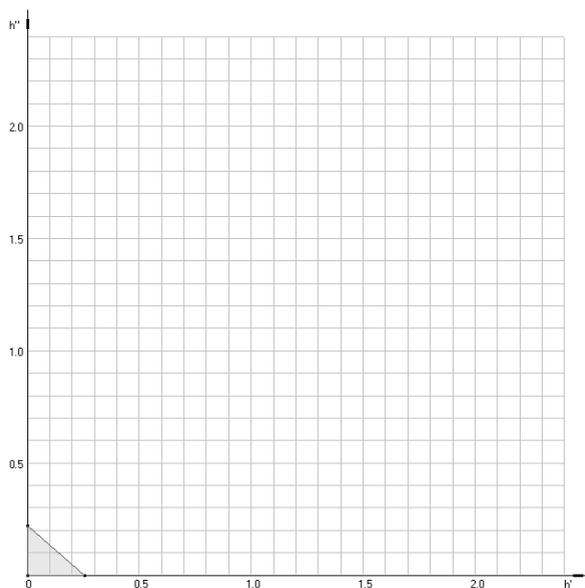
\*данные об отцепках состава:

\*число вагонов, номер стрелки, Sprc

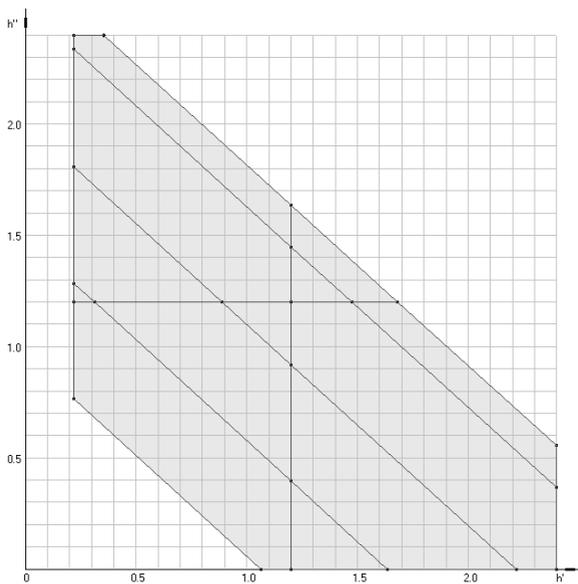
\*тип, к-во осей+подш, вес, основное сопр.

1	0	410			
пв			4р	22.0	4.50
1	5	410			
пв			4р	80.0	1.50
1	5	700			
пв			4р	57.0	1.50
1	4	400			
пв			4р	85.0	0.50
1	2	650			
пв			4р	37.0	2.50

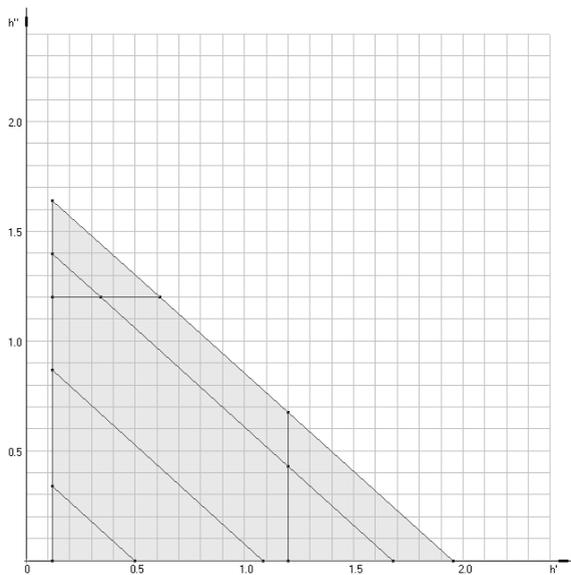
**Д.2. Области допустимых режимов торможения отцепов**



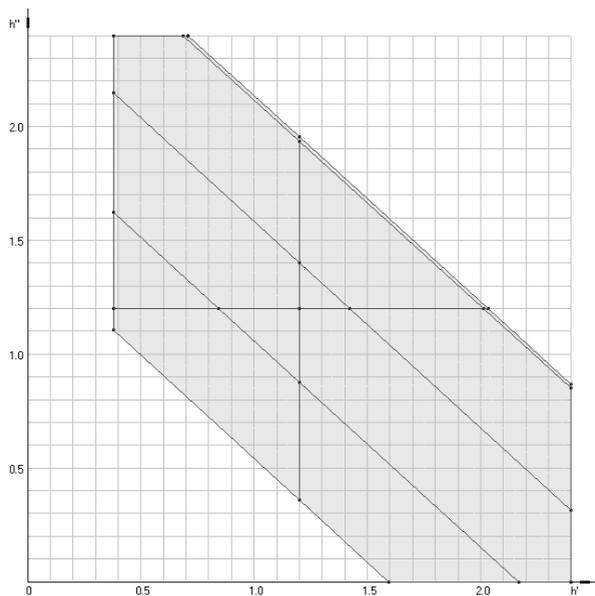
**Рисунок Д.1** - Область допустимых режимов торможения отцепов 1



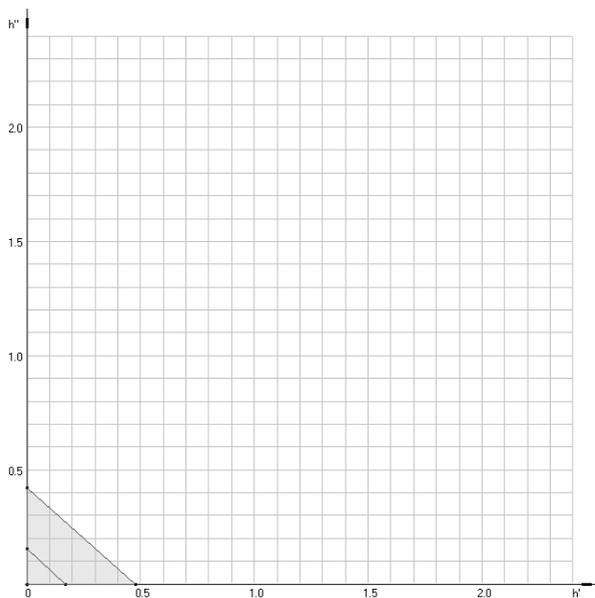
**Рисунок Д.2** - Область допустимых режимов торможения отцепа 2



**Рисунок Д.3** - Область допустимых режимов торможения отцепа 3



**Рисунок Д.4** - Область допустимых режимов торможения отцепа 4



**Рисунок Д.5** - Область допустимых режимов торможения отцепа 5

### Д.3. Результаты предварительного этапа оптимизации режимов

**торможения отцепов состава; режимы торможения отцепов выбирались без ограничения энергетических расходов  $h_i \in \Omega_{\Sigma_i}(\bar{E}_{отц})$ :**

Отцеп 1, 1ваг

ht: 0.00000 0.00000 0.00000 \*- Nт=0.0  
Spr=410 Vпр=1.391 L= 0 E=0.000  
tza(5)=53.83567

Отцеп 2, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5

ht: 1.65140 0.00000 0.78986 \*- Nт=2.6  
Spr=410 Vпр=1.500 L= 0 E=0.281  
t0(1-2)=6.86729, tdo(5)=53.18911, tza(5)=57.76962,  
dt(1-2)=6.22073

Отцеп 3, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5

ht: 1.56097 0.35245 0.00000 \*- Nт=3.0  
Spr=700 Vпр=0.000 L= 0 E=0.371  
t0(2-3)=8.25458, tdo(5)=55.73764, tza(4)=49.42673,  
dt(2-3)=6.22261

Отцеп 4, 1ваг, стрелка разд с предыд - 4

ht: 0.58438 2.40000 0.06884 \*- Nт=3.3  
Spr=400 Vпр=1.500 L= 0 E=0.388  
t0(3-4)=7.82030, tdo(4)=47.83870, tza(2)=27.93593,  
dt(3-4)=6.23227

Отцеп 5, 1ваг, стрелка разд с предыд - 2

ht: 0.47717 0.00000 0.00000 \*- Nт=1.0  
Spr=650 Vпр=0.000 L= 0 E=0.124  
t0(4-5)= 8.97839, tdo(2)=25.17158, tza(0)=0.00000,  
dt(4-5)=6.21404

**Д.4. Результаты первого этапа оптимизации режимов торможения отцепов состава режимы торможения каждого отцепа выбирались из области с минимальными затратами энергии**

Отцеп 1, 1ваг

ht: 0.00000, 0.00000, 0.00000 \*- Nт=0.0  
Spr=410 Vпр=1.391 Lок= 0 E=0.000  
tza(5)=53.83567

Отцеп 2, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5

ht: 1.20000, 0.00000, 1.10417 \*- Nт=1.9  
Spr=410 Vпр=1.502 Lок= 0 E=0.174  
t0(1-2)=6.86729, tdo(5)=49.01096, tza(5)=53.03384,  
dt(1-2)=2.04258

Отцеп 3, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5

ht: 1.17906, 0.00000, 0.33636 \*- Nт=1.3  
Spr=700 Vпр=1.505 Lок= 0 E=0.140

t0(2-3)=8.25458, tdo(5)=49.65490, tza(4)=44.77732,  
dt(2-3)=4.87565

Отцеп 4, 1ваг, стрелка разд с предыд - 4  
ht: 1.11456, 1.20000, 0.61164 -\* - Nт=2.6  
Spr=400 Vпр=1.501 Лок= 0 E=0.281  
t0(3-4)=7.82030, tdo(4)=41.85624, tza(2)=28.86916,  
dt(3-4)=4.89922

Отцеп 5, 1ваг, стрелка разд с предыд - 2  
ht: 0.00000, 0.00000, 0.11053 -\* - Nт=0.3  
Spr=650 Vпр=1.503 Лок= 0 E=0.017  
t0(4-5)=8.97839, tdo(2)=24.76876, tza(0)=0.00000,  
dt(4-5)=4.87799

### **Д.5. Результаты второго этапа оптимизации режимов торможения отцепов состава; режимы торможения второго отцепа выбирались из области с ограничением расхода энергии $E_{отц2} \leq 0,264$**

Отцеп 1, 1ваг  
ht: 0.00000, 0.00000, 0.00000 -\* - Nт=0.0  
Spr=410 Vпр=1.391 Лок= 0 E=0.000  
tza(5)=53.83567

Отцеп 2, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5  
ht: 1.20000, 0.00000, 1.10417 -\* - Nт=1.9  
Spr=410 Vпр=1.502 Лок= 0 E=0.174  
t0(1-2)=6.86729, tdo(5)=49.01096, tza(5)=53.03384,  
dt(1-2)=2.04258

Отцеп 3, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5  
ht: 1.17906, 0.00000, 0.33636 -\* - Nт=1.3  
Spr=700 Vпр=1.505 Лок= 0 E=0.140  
t0(2-3)=8.25458, tdo(5)=49.65490, tza(4)=44.77732,  
dt(2-3)=4.87565

Отцеп 4, 1ваг, стрелка разд с предыд - 4  
ht: 1.11456, 1.20000, 0.61164 -\* - Nт=2.6  
Spr=400 Vпр=1.501 Лок= 0 E=0.281  
t0(3-4)=7.82030, tdo(4)=41.85624, tza(2)=28.86916,  
dt(3-4)=4.89922

Отцеп 5, 1ваг, стрелка разд с предыд - 2  
ht: 0.00000, 0.00000, 0.11053 -\* - Nт=0.3  
Spr=650 Vпр=1.503 Лок= 0 E=0.017  
t0(4-5)=8.97839, tdo(2)=24.76876, tza(0)=0.00000,  
dt(4-5)=4.87799

**Д.6. Результаты третьего этапа оптимизации режимов торможения отцепов состава режимы торможения второго отцепа выбирались из области с ограничением расхода энергии  $E_{отц3} \leq 0,281$**

Отцеп 1, 1ваг  
ht: 0.00000, 0.00000, 0.00000 -\* - Nт=0.0  
Spr=410 Vпр=1.391 Лок= 0 E=0.000  
tza(5)=53.83567

Отцеп 2, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5  
ht: 1.03557, 0.54431, 0.79968 -\* - Nт=2.6  
Spr=410 Vпр=1.501 Лок= 0 E=0.281  
t0(1-2)=6.86729, tdo(5)=50.24323, tza(5)=54.80222,  
dt(1-2)=3.27485

Отцеп 3, 1ваг, стрелка разд с предыд - 5  
ht: 1.20000, 0.00000, 0.32225 -\* - Nт=1.3  
Spr=700 Vпр=1.505 Лок= 0 E=0.140  
t0(2-3)=8.25458, tdo(5)=49.82090, tza(4)=44.91650,  
dt(2-3)=3.27326

Отцеп 4, 1ваг, стрелка разд с предыд - 4  
ht: 1.12779, 1.20000, 0.60245 -\* - Nт=2.6  
Spr=400 Vпр=1.501 Лок= 0 E=0.281  
t0(3-4)=7.82030, tdo(4)=41.95195, tza(2)=28.89694,  
dt(3-4)=4.85576

Отцеп 5, 1ваг, стрелка разд с предыд - 2  
ht: 0.00000, 0.00000, 0.11053 -\* - Nт=0.3  
Spr=650 Vпр=1.503 Лок= 0 E=0.017  
t0(4-5)=8.97839, tdo(2)=24.76876, tza(0)=0.00000,  
dt(4-5)=4.85021

*Научное издание*

*В. И. БОБРОВСКИЙ, Д. Н. КОЗАЧЕНКО, Н. П. БОЖКО, Н. В. РОГОВ,  
Н. И. БЕРЕЗОВЫЙ, А. В. КУДРЯШОВ*

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ  
ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ**

Монография  
(на русском языке)

Редактор *С. В. Мямлин*  
Компьютерная верстка *А. А. Заиченко*  
Дизайн обложки *А. А. Заиченко*  
Компьютерный набор *А. А. Заиченко*

Издательство Маковецкий Юрий Вадимович  
Свидетельство ДК № 2665 от 25.10.2006 г.  
49000, Украина, г. Днепропетровск, ул. Плеханова, 16, к.14  
Тел. (056) 798-33-64, факс (0562) 36-79-93  
e-mail: euopress@gala.net

Отпечатано:  
ООО фирма „Вета”. г. Днепропетровск, ул. Наб. Ленина, 9,  
тел. (056) 370-30-22.  
Подписано в печать 18.01.10г. Формат 29,7x42<sup>1</sup>/<sub>4</sub>. Бумага офсетная.  
Печать ризограф. Усл.печ.л. 15,01. Тираж 300 экз.

ISBN 978-966-1507-25-7