

УДК 656.212.5

Вероятностная оценка уклона путей в сортировочном парке при реализации режима интервально-прицельного торможения

А. А. Климов

Сибирский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Для цитирования: *Климов А. А.* Вероятностная оценка уклона путей в сортировочном парке при реализации режима интервально-прицельного торможения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 430–443. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-430-443

Аннотация

Цель: Определение критериев для оценки значения уклона путей в сортировочном парке при реализации режима интервально-прицельного торможения отцепов. Действующие нормативы устанавливают одинаковые значения уклонов сортировочных путей для всех горочных станций. При этом на каждой сортировочной горке есть особенности конструкции и технического оснащения, перерабатываемый вагонопоток также имеет специфику, а метеорологические условия местности являются уникальными. Следовательно, значения уклонов сортировочных путей должны определяться с учетом указанных выше особенностей расчетным путем для каждой конкретной горки. **Методы:** При выполнении исследований использовались: требования нормативных документов к конструкции элементов продольного профиля сортировочных путей, существующие числовые характеристики основного удельного сопротивления движению вагонов и методики расчета работы удельных сил сопротивления движению вагонов при скатывании с горки. Исследование процесса накопления составов производилось методом имитационного моделирования скатывания отцепов по сортировочному пути от парковой тормозной позиции до точки остановки. Обработка результатов экспериментов выполнялась с использованием методов теории вероятностей и математической статистики. **Результаты:** Установлено, что оценка значения уклона основной части сортировочных путей может производиться на основании определения следующих показателей: вероятности недокатывания отцепов до стоящих в парке групп вагонов; вероятности соединения отцепов со стоящей в парке группой вагонов с повышенными скоростями; вероятности соответствия результатов скатывания отцепов потребным условиям эксплуатации. Приведенный метод оценки значения уклона основной части путей сортировочного парка может использоваться для сортировочных горок, на которых реализуется режим интервально-прицельного торможения. Особенностью данного режима регулирования скорости движения отцепов является отсутствие на сортировочном пути дополнительных технических средств, позволяющих воздействовать на движущийся отцеп, что определяет случайный характер процесса накопления составов, для оценки качества которого целесообразно использовать вероятностные показатели. **Практическая значимость:** Предлагаемый метод может использоваться для оценки качества функционирования сортировочных горок, а также при сравнении вариантов проектных решений при строительстве новых или реконструкции существующих сортировочных парков.

Ключевые слова: Уклон путей сортировочного парка, основное удельное сопротивление движению вагонов, имитационное моделирование процесса заполнения сортировочных путей, дальность пробега отцепов, скорость соударения вагонов, режимы регулирования скорости скатывания отцепов.

Введение

Согласно действующим нормативам [1] уклон основной части сортировочного пути проектируется на спуске 0,6 ‰ по направлению скатывания. Установленное значение уклона должно способствовать продвижению отцепов вглубь сортировочного парка (СП) и повышению качества процесса накопления составов. При заполнении путей СП должны исключаться разгоны и ускоренное движения отцепов, что может приводить к возникновению случаев их соединения со стоящими в парке вагонами с повышенными скоростями и создавать условия нарушения безопасности сортировочного процесса. Выходная часть парка (длиной 100–150 м) должна располагаться на подъеме по направлению скатывания — на противоуклоне со значением 2,0 ‰ [1], что в совокупности с укладкой охранных башмаков, установкой «барьерных групп» или дополнительных технических средств для задержания вагонов должно исключать возможность выхода подвижного состава за пределы СП.

Ранее допускались большие значения уклонов основной части сортировочного пути — от парковой тормозной позиции (ПТП) до участка выходной части, расположенной на противоуклоне:

- согласно [2] на эксплуатируемых горках с целью снижения затрат на реконструкцию допускалось проектировать начальную часть пути СП (длиной на половину состава) на спуске со значением уклона 1,0 ‰, а оставшуюся часть пути (до противоуклона) — на спуске с уклоном 0,6 ‰;

- согласно [3] основная часть пути СП должна была проектироваться в виде двухэлементного профиля: начальный участок (длиной на половину состава) располагался на спуске (до 1,0 ‰), последующий элемент (до противоуклона) — на спуске (не более 0,5 ‰), указанные условия проектирования применялись для неавтоматизированных горок.

В еще более ранних нормативах [4–6] допускалось увеличение значений уклонов сортировочного пути до 2,0 ‰, что обосновывалось эксплуатацией подвижного состава с подшипниками скольжения, имеющими большие значения сил основного сопротивления движению вагонов по сравнению с подшипниками качения.

Таким образом, в настоящее время для всех станций сети железных дорог установлено нормативное значение уклона основной части сортировочного пути — 0,6 ‰, что достаточно сложно обеспечить в реальных условиях эксплуатации, вследствие возникновения просадок участков пути и других причин, приводящих к отклонению продольного профиля подгорочного парка от проектного [7, 8]. В результате в СП образуются локальные участки пути, имеющие:

- уклоны более нормативного, что может способствовать разгону отцепов и увеличению вероятности соединения вагонов на пути СП с повышенными скоростями;

- уклоны менее нормативного (в том числе противоуклоны), что может приводить к снижению скорости скатывания отцепов (вплоть до их остановки), а в отдельных случаях и к обратному следованию — навстречу очередным отцепам, что также повышает вероятность возникновения случаев соударения вагонов с повышенными скоростями.

Одним из основных факторов, определяющих результат скатывания отцепов по сортировочному пути, является воздействие сил сопротивления движению вагонов, из которых наибольшее влияние оказывают:

- основное удельное сопротивление движению (w_0), имеющее широкий диапазон возможных значений, что значительно повышает фактор случайности при определении точки остановки отцепа на пути СП;

- удельное сопротивление движению от среды и ветра ($w_{св}$), характер действия которого также носит случайный характер, связанный не только

с особенностями воздействия ветровых нагрузок на подвижной состав (вагоны разного типа, порывистость ветра и др.), но и с текущим заполнением соседних сортировочных путей, что создает (или не создает — если соседние пути парка свободные) дополнительную защиту от ветра на вагоны, находящиеся на рассматриваемом пути.

Отдельные сортировочные станции в силу местных условий имеют отклонения продольного профиля путей сортировочных парков от нормативных значений, как следствие исторического развития и поэтапной реализации реконструктивных мероприятий в периоды действия различных нормативных требований. На таких станциях приведение продольного профиля в соответствие с действующими нормативами, как правило, требует реконструкцию не только сортировочного парка, но и горочной горловины, а также выходной горловины парка приема, вытяжных путей формирования и входной горловины парка отправления (для сортировочных станций с последовательным расположением парков), что связано со значительными затратами и в основном приводит к поиску дополнительных организационно-технологических решений или внедрением современных технических средств управления роспуском, направленных на повышение безопасности сортировочного процесса.

На большинстве горок в Российской Федерации в СП имеется одна тормозная позиция, расположенная в начальной части полезной длины сортировочного пути. Поэтому дальность пробега отцепов и показатели процесса заполнения путей СП при реализации режима интервально-прицельного торможения во многом определяются скоростью выхода отцепа с ПТП. При наличии дополнительных технических средств на сортировочных путях возможна реализация других режимов регулирования скорости скатывания отцепов, получивших распространение на зарубежных железных дорогах [9]:

- квазинепрерывного регулирования, заключающегося в использовании на всем маршруте скатывания отцепов точечных вагонных замедлителей, ускорителей и ускорителей-замедлителей;
- принудительного перемещения вагонов вглубь сортировочного парка с использованием специальных технических средств (вагоноосаживателей, робототехники и др.);
- совокупности квазинепрерывного регулирования скорости скатывания отцепов и принудительного перемещения вагонов (как правило, в СП), которые могут применяться на разных участках сортировочной горки и путей накопления составов.

При реализации указанных способов регулирования скорости скатывания отцепов уклоны путей в СП могут быть увеличены с учетом числа и места расположения дополнительных технических средств. Это приводит к увеличению капитальных затрат на реализацию проекта, а также эксплуатационных расходов на содержание и обслуживание технических средств (особенно в зимний период в регионах с большим снегоприносом). В том числе поэтому указанные режимы регулирования скорости скатывания отцепов пока не нашли широкого применения в РФ.

Наиболее распространенным режимом регулирования скорости скатывания отцепов на сети железных дорог РФ является интервально-прицельное торможение, заключающееся в создании необходимых пространственно-временных интервалов между смежными (последовательно скатывающимися) отцепами на протяжении общей для обоих отцепов части маршрута следования. Особенностью данного режима является то, что регулирование скорости скатывания отцепов производится только на тормозных позициях. Следовательно, общий запас энергии отцепа на вершине горки (в начале маршрута) должен обеспечивать достижение потребной дальности пробега с учетом его торможения на промежуточных

точках маршрута скатывания. Исключение преждевременной остановки отцепа обеспечивается конфигурацией продольного профиля спускной части (где уклоны проектируются на спуске по направлению скатывания) и путей СП, элементы которого должны также располагаться на спусках по направлению движения отцепов, что создает условия для дальнейшего движения отцепа за счет действия силы тяжести (в том числе в случаях избыточного торможения, когда отцеп может остановиться в пределах тормозной позиции).

Необходимо отметить, что при интервально-прицельном торможении последнее воздействие на движущийся отцеп можно произвести на ПТП, расположенной в начале полезной длины пути СП (устройство второй ПТП в СП допускается при определенных условиях, но большинство горок сети железных дорог РФ оборудованы одной ПТП). Дальнейшее скатывание отцепов производится по сортировочному пути, не оборудованному техническими средствами регулирования скорости скатывания, в связи с чем данный процесс следует рассматривать как случайный, а фактическая дальность пробега отцепа может оказаться как менее потребной (при недокатывании отцепа до группы вагонов и образовании на участке сортировочного пути пространственного промежутка — «окна»), так и более потребной дальности (что приведет к соединению отцепов со стоящими в парке вагонами), при этом скорость соединения вагонов может превысить допустимое значение (согласно ПТЭ — 5 км/ч для основной части отцепопотока [10]).

Таким образом, к основным причинам возникновения случаев нарушения условий безопасности процесса заполнения путей СП при роспуске и выполнения дополнительной маневровой работы при накоплении составов следует отнести:

- несоответствие значений уклонов сортировочных путей действующим нормативам

вследствие отклонения продольного профиля от проектного в процессе эксплуатации или особенностей развития станции;

- реализацию режима интервально-прицельного торможения, при котором в СП после ПТП отсутствует возможность регулирования скорости движения отцепов, что определяет случайный характер его скатывания по пути накопления;

- широкий диапазон возможных значений сопротивления (w_0), которое является случайной величиной и характеризует ходовые характеристики скатывающихся вагонов;

- случайный характер воздействия на отцепы сопротивления ($w_{св}$), которое может принимать как положительные значения (уменьшать скорость движения), так и отрицательные значения — создавать условия для движения отцепов в обратном направлении.

Действующие нормативные требования к значению уклона сортировочных путей сформировались с учетом опыта эксплуатации сортировочных устройств. При этом нормативное значение уклона сортировочного пути (0,6 ‰), установленное для всех сортировочных горок сети, не является расчетной характеристикой, учитывающей специфику расположения, технического оснащения и технологии работы конкретной станции. Поэтому задача по установлению критериев для оценки значения уклона продольного профиля основной части сортировочного пути и формированию методики их определения является актуальной на современном этапе развития теории расчета сортировочных горок.

Методы исследования

Решение данной задачи должно производиться с учетом особенностей технического оснащения СП и применяемого режима корректировки скорости движения отцепов. Так, для режима квазинепрерывного регулирования скорости, принудительного перемещения вагонов и совокупностей

указанных способов могут применяться отдельные методики, учитывающие возможность увеличения значения уклона путей в СП при расположении в парке дополнительных технических средств регулирования скорости движения отцепов.

Для режима интервально-прицельного торможения оценку значения уклона основной части сортировочного пути целесообразно производить на основании анализа дальности пробега отцепов в парке, которая также является случайной величиной, зависящей от:

- характеристик отцепа (числа вагонов в отцепе, типа и массы каждого вагона в отцепе);
- характеристик сортировочного пути (параметров плана и продольного профиля);
- метеорологических условий местности (температуры наружного воздуха, расчетного направления и скорости ветра).

Потребная дальность пробега каждого отцепа определяется по условию его докатывания до ближайшей на сортировочном пути группы вагонов и соединения с ней (при этом скорость соединения вагонов не должна превысить допустимую скорость соударения). При отсутствии в СП дополнительных технических средств для корректировки скорости движения отцепов задача определения потребной дальности пробега для каждого отцепа сводится к установлению необходимой скорости выхода отцепа с ПТП, обеспечивающей достижение указанного результата. В условиях эксплуатации необходимая скорость выхода отцепа с ПТП определяется:

- на автоматизированных горках с использованием подсистемы контроля заполнения сортировочных путей (КЗП);
- на механизированных горках — оператором тормозной позиции;
- на немеханизированных горках — регулятором скорости движения вагонов.

Во всех случаях необходимая скорость выхода отцепа с ПТП определяется с учетом ряда ука-

занных выше факторов, которые в основном являются случайными величинами и могут изменяться в процессе следования отцепа по пути накопления состава. Вследствие этого, возникают случаи недостижения отцепами расчетной точки остановки на пути СП. В результате на пути накопления образуются «окна» — свободные участки пути (пространственные промежутки между вагонами). Либо возникают случаи, когда отцеп докатывается до находящегося на пути накопления подвижного состава, но соединение вагонов может производиться как с допустимыми значениями скоростей, так и с повышенными скоростями.

В связи с этим предлагается производить оценку значения уклона основной части путей СП с использованием следующих критериев:

1. Вероятности превышения допустимой скорости соединения отцепов с вагонами, находящимися на пути накопления составов (P_1).
2. Вероятности недокатывания отцепов до стоящих в парке вагонов и образования «окон» (P_2).
3. Вероятности докатывания отцепов до стоящих в парке вагонов и соединения с допустимой скоростью (P_3).

Расчет указанных критериев производится для каждого (i -го) отцепа по результатам моделирования скатывания по сортировочному пути от ПТП до места остановки. Каждый критерий может быть определен и в целом для всего накапливаемого состава по формуле:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}, \quad (1)$$

где p_i — соответствующая вероятность для каждого i -го отцепа, направляемого на путь накопления;

n — число отцепов в накопленном составе.

Результаты расчета вероятностей как для каждого отцепа, так и для всего накапливаемого состава должны соответствовать условию:

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1. \quad (2)$$

Выбор наилучшего варианта следует производить по условию:

$$\begin{cases} P_1 \rightarrow \min \\ P_2 \rightarrow \min \\ P_3 \rightarrow \max \end{cases} \quad (3)$$

В качестве комплексного критерия, характеризующего процесс накопления всего состава на рассматриваемом пути СП, также используется критерий, отражающий общий показатель процесса заполнения — среднее число осаживаний, приходящееся на один накопленный состав ($N_{ос}$).

Учитывая то, что наилучшими и наихудшими ходовыми свойствами обладают отцепы из одиночных вагонов, для оценки значения уклона основной части сортировочных путей моделируется скатывание одиночных вагонов. В качестве примера расчет произведен для вагонов, имеющих наибольший разброс возможных значений случайной величины $w_0 \in [0,5; 4,5]$ Н/кН ([2]) — для легкой весовой категории.

Скатывание отцепов производилось для расчетных неблагоприятных метеорологических условий, определенных для одного расчетного месяца по методике [11]. Скорость выхода отцепов с ПТП определялась с учетом потребной дальности пробега каждого отцепа, при этом скатывание на свободный сортировочный путь производилось со скоростью, рассчитанной с учетом технических характеристик замедлителей ПТП.

Оценка значения уклона основной части пути накопления составов производилась на основании результатов имитационного моделирования процесса заполнения путей СП (с использованием специализированного программного комплекса, разработанного в СГУПС [12]). Для заданных условий производилось моделирование движения отцепов по сортировочному пути от нижнего конца ПТП до точки остановки (или

до ближайшего вагона, находящегося на сортировочном пути), на основании чего определялись установленные критерии оценки процесса накопления всего состава [13, 14].

Результаты моделирования использовались для оценки значений уклона основной части сортировочного пути. При необходимости указанные критерии можно использовать для сравнения вариантов конструкции продольного профиля сортировочных парков автоматизированных, механизированных и немеханизированных горок, где реализуется режим интервально-прицельного торможения отцепов.

При имитационном моделировании скорость выхода отцепа в парк (с ПТП) определялась обратным счетом по условию докатывания до заданной точки остановки. Расчет выполнялся для средних значений величины w_0 легкой весовой категории. Фактическая дальность пробега отцепа определялась как среднее значение для серии из 500 экспериментов по скатыванию одного и того же одиночного вагона определенного типа (с одинаковыми значениями массы), но с разными значениями сопротивления (w_0), которые генерировались автоматически на основании заданных числовых характеристик.

Результаты исследований

По результатам имитационного моделирования процесса заполнения сортировочного пути определены следующие показатели (табл. 1).

По результатам моделирования установлено, что для накопления состава установленной длины на рассматриваемый путь необходимо направить 68 отцепов из одиночных вагонов. Так как моделировалось движение вагонов легкой весовой категории, оценка качества заполнения путей СП фактически производилась по результатам скатывания «плохих» и «очень плохих бегунов» в неблагоприятных условиях. В результате для заполнения всего пути накопления потребо-

Таблица 1. Фрагмент результатов моделирования процесса заполнения сортировочного пути (отцепы из одиночных вагонов, легкая весовая категория, условия неблагоприятные)

Номер отцепа	Масса отцепа, т	Показатели процесса заполнения пути			Средняя фактическая дальность пробега, м
		P_1	P_2	P_3	
Группа № 1 (скатывание производится на свободный сортировочный путь)					
1	25	0,000	1,000	0,000	478
2	24	0,318	0,504	0,178	433
3	22	0,322	0,454	0,224	417
4	23	0,346	0,416	0,238	362
5	24	0,282	0,454	0,264	328
6	26	0,268	0,448	0,284	293
7	25	0,254	0,462	0,284	262
8	25	0,184	0,510	0,306	229
9	23	0,186	0,454	0,36	201
10	23	0,138	0,470	0,392	174
11	25	0,106	0,466	0,428	148
12	23	0,054	0,470	0,476	124
13	27	0,016	0,458	0,526	101
14	27	0,000	0,442	0,558	80
15	22	0,000	0,436	0,564	60
16	24	0,000	0,492	0,508	41
17	27	0,000	0,418	0,582	24
18	24	0,000	0,000	1,000	8
Группа № 2 (оставшаяся часть пути после осаживания группы № 1)					
19	24	0,000	1,000	0,000	473
...	...	...	...	...	...

валось выполнить 4 осаживания, при этом необходимость выполнения осаживания возникала после скатывания отцепов № 18, 36, 53 и 63, когда оставшаяся свободная часть сортировочного пути (потребная дальность пробега) была меньше длины следующего отцепа.

Графическая интерпретация вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью (P_1) для рассматриваемого варианта накопления состава на сортировочном пути приведена на рис. 1.

Согласно рис. 1, накопление состава произведено четырьмя группами, при этом фактически состав образовался из 5 групп вагонов. Из-за незначительной длины свободной части сортиро-

вочного пути, оставшейся для накопления групп № 4 и 5, вероятность соединения вагонов с повышенной скоростью (P_1) для указанных групп вагонов уменьшается по мере приближения к ПТП, что и отражено на рис. 1.

Наибольшую вероятность превышения допустимой скорости соударения вагонов имеют первые вагоны каждой группы с последующим убыванием значений P_1 по мере заполнения пути СП и сокращения оставшейся свободной части пути (потребной дальности пробега). Соотношение вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью и фактической дальности пробега отцепов на примере первой группы вагонов накапливаемого состава приведено на рис. 2.

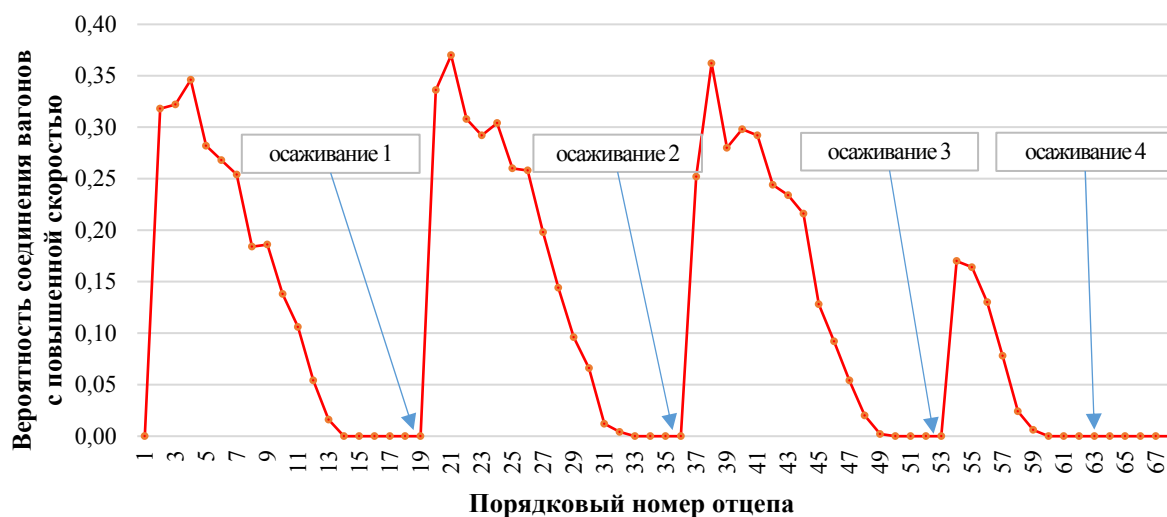


Рис. 1. Изменение вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью (P_1) при накоплении состава из одиночных порожних вагонов, условия неблагоприятные

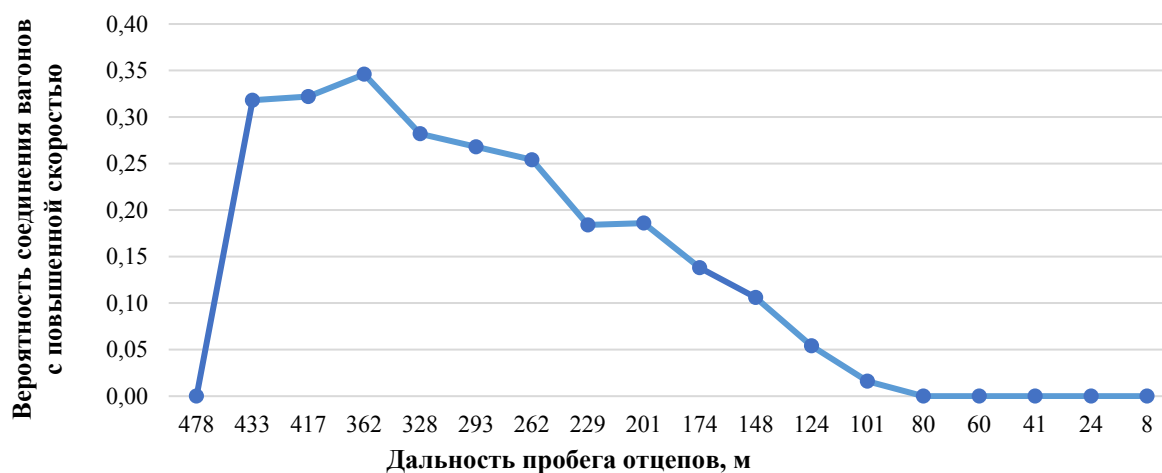


Рис. 2. Соотношение фактической дальности пробега отцепов и вероятности соединения вагонов с повышенной скоростью, группа № 1

Таким образом, для неблагоприятных условий, при скатывании одиночных вагонов легкой весовой категории («плохих бегунов») и нормативном значении уклона основной части сортировочного пути (0,6 ‰) получены следующие результаты:

– максимальная дальность пробега отцепов на свободный сортировочный путь составляет около 480 м (значение получено с учетом ограничения по скорости входа на замедлители ПТП и, как следствие, скорости выхода отцепов с парковой тормозной позиции);

– обеспечение вероятности превышения допустимой скорости соударения вагонов на уровне $P_1 = 0,0$ достигается только для начального участка сортировочного пути длиной не более 100 м от ПТП.

Необходимо отметить, что в данном случае приведены результаты расчета для неблагоприятных условий работы и в реальных условиях эксплуатации показатели процесса заполнения сортировочного пути при роспуске отцепопотока с разным числом вагонов могут быть лучше.

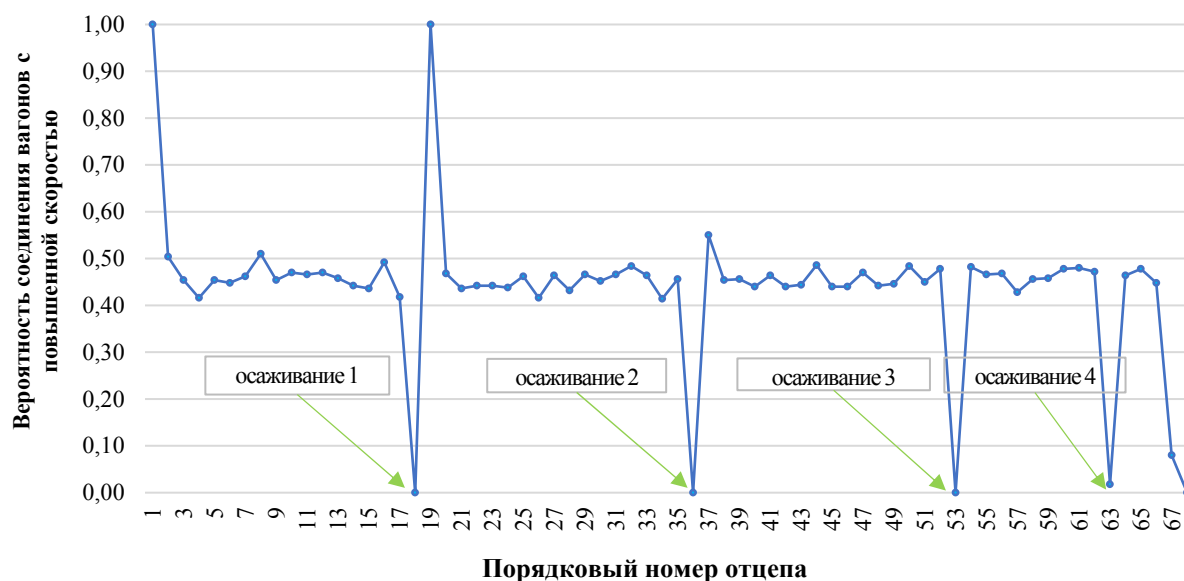


Рис. 3. Вероятность недокатывания отцепа до стоящей на сортировочном пути группы вагонов (P_2) при накоплении состава из одиночных порожних вагонов, условия неблагоприятные

Кроме того, на автоматизированных сортировочных горках, оборудованных системой КЗП, значение скорости выхода отцепов с ПТП определяется с учетом ходовых характеристик каждого отцепа, рассчитанных по результатам прохождения предыдущих контрольных точек по маршруту скатывания. В связи с этим в реальных условиях эксплуатации автоматизированных сортировочных горок вероятность докатывания отцепов до стоящих в парке вагонов и соединения с ними с допустимой скоростью (P_3) будет увеличиваться.

Графическая интерпретация вероятности преждевременной остановки отцепов (недокатывания до стоящей на пути накопления группы вагонов — P_2) приведена на рис. 3.

Согласно рис. 3, основная часть отцепов имеет значение вероятности около $P_2 = 0,45$, что объясняется широким диапазоном возможных значений основного удельного сопротивления движению и точностью выполнения расчетов — при моделировании перемещение отцепа рассчитывается с шагом 1 см. Первые отцепы групп № 1 и 2 имеют вероятность $P_2 = 1,0$, так как длина свободного участка пути более потребной дальности пробега.

Вероятность $P_2 = 0,0$ для последних отцепов каждой группы (так как в данном случае длина оставшейся части пути менее длины последующего скатывающего отцепа) — по данному значению и определяется потребность выполнения осаживания очередной группы вагонов на сортировочном пути.

Графическая интерпретация вероятности выполнения необходимых условий заполнения сортировочного пути, когда отцеп должен докатиться до ближайшей группы вагонов и соединиться с ней с допустимой скоростью (P_3) приведена на рис. 4.

Согласно рис. 4 значение вероятности увеличивается по мере заполнения сортировочного пути и достигает значения $P_3 = 1,0$ для отцепов, после скатывания которых необходимо выполнять осаживание.

Результаты расчета рассматриваемых критериев оценки значения уклона основной части сортировочного пути по результатам моделирования накопления всего состава приведены на рис. 5.

Согласно полученным результатам для принятых условий проведения экспериментов веро-

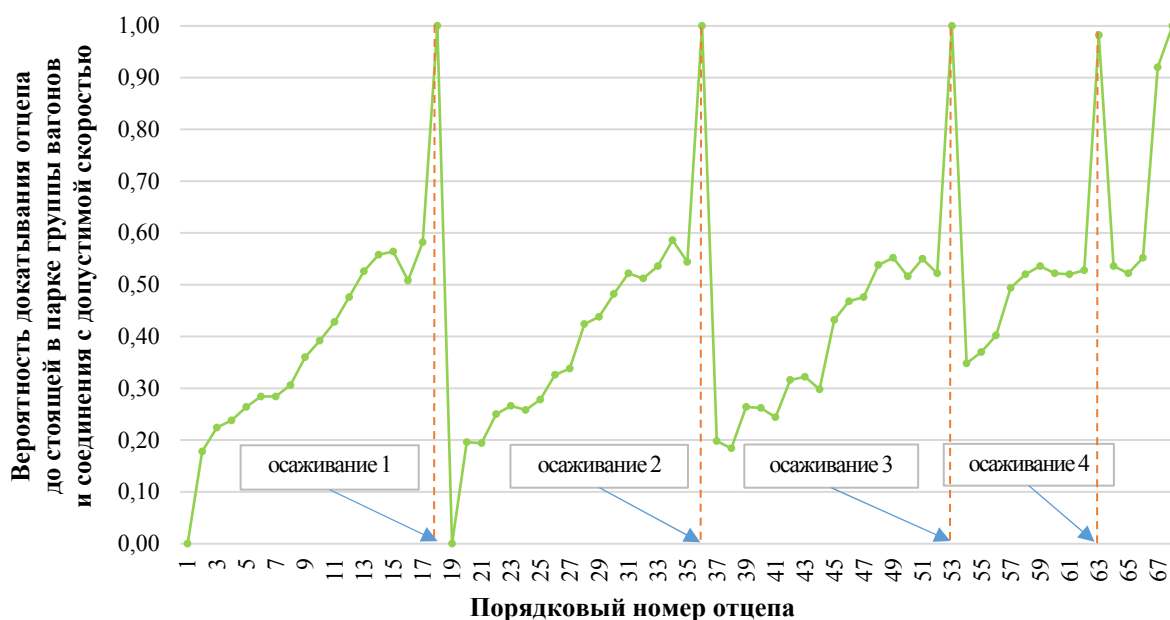


Рис. 4. Вероятность докатывания отцепа до стоящей на сортировочном пути группы вагонов и соединения с допустимой скоростью (P_2) при накоплении состава из одиночных порожних вагонов, условия неблагоприятные

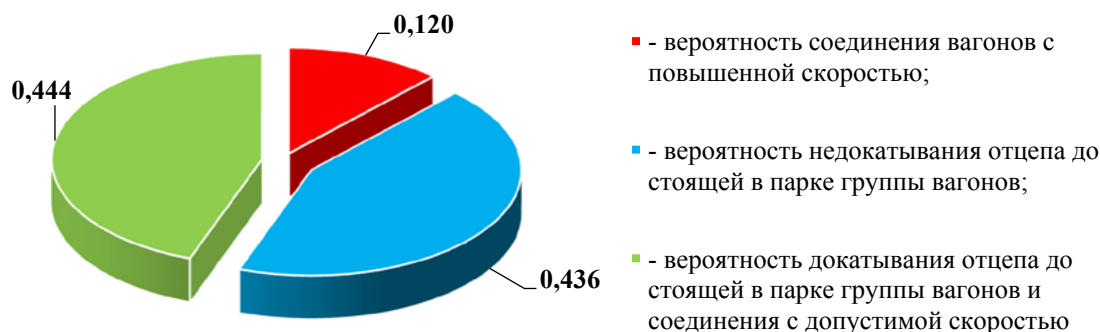


Рис. 5. Распределение вероятностей P_1 , P_2 и P_3 по результатам моделирования накопления состава на сортировочном пути

ятность превышения допустимой скорости соединения вагонов при накоплении всего состава на сортировочном пути при роспуске достигает значения $P_1 = 0,12$. Полученное значение рекомендуется использовать при сравнении вариантов конструкции продольного профиля основной части пути СП.

Выводы

Разработанный метод вероятностной оценки значения уклона основной части пути накопления составов можно использовать и при сравнении

вариантов конструкции продольного профиля сортировочных парков. Полученные результаты показывают, что установленные нормативные значения уклона сортировочного пути (0,6 ‰) не гарантируют соблюдение условий обеспечения безопасности сортировочного процесса при реализации режима интервально-прицельного торможения. Сравнение вариантных значений уклона основной части сортировочного пути для каждой станции в первую очередь целесообразно проводить по критерию вероятности превышения допустимой скорости соединения вагонов (P_1).

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Список источников

1. СП 119.13330.2024. СНИП 32-01-95. Свод правил. Железные дороги колеи 1520 мм: утв. Мин. строит. и жил.-комму. хоз. РФ, 01.07.2024, № 432/пр.

2. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм: утв. МПС РФ 10.10.03. — М.: Техинформ, 2003. — 168 с.

3. Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР: ВСН 56-78. — Введ. 01.01.1979 / Минтрансстрой СССР, МПС СССР. — М.: Транспорт, 1978. — 175 с.

4. Технические указания на проектирование станций и узлов: утв. МПС СССР 24.11.1947 / ВНИИ ж.-д. трансп. — М.: Трансжелдориздат, 1948. — 124 с.

5. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР: ВСН 56-61: утв. МПС СССР 12.06.1961. — М.: Трансжелдориздат, 1961. — 151 с.

6. Технические указания по проектированию станций и узлов на железных дорогах общей сети Союза ССР: изменения и дополнения № 1: ВСН 56-65: утв. МПС СССР 30.07.1965. — М.: Оргтрансстрой, 1965. — 26 с.

7. Боровлев П. В. Оценка отклонения профиля пути сортировочного парка в режиме реального времени / П. В. Боровлев // Железная дорога: путь в будущее: сборник материалов I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 года. — М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2022. — С. 300–304.

8. Коваленко Н. А. Факторы, определяющие величину и нормы закрепления «барьерных групп» / Н. А. Коваленко, А. А. Бородин, К. А. Тарасов // Мир транспорта. — 2019. — Т. 17. — № 6(85). — С. 242–257. — DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-242-257.

9. Шейкин В. П. Эффективность систем квазинепрерывного регулирования скорости отцепов на сортировоч-

ных горках с использованием точечных вагонных заместителей / В. П. Шейкин, В. А. Кобзев, В. И. Метельский // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 1992. — № 5. — С. 17–21.

10. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. — М.: ИНФРА-М, 2022. — 561 с.

11. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР: ВСН 207-89 / МПС СССР. — М.: Транспорт, 1992. — 104 с.

12. Свид. 2023618062 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета показателей процесса заполнения путей сортировочного парка / А. А. Климов, А. А. Гунбин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС (RU). — № 2023616946; заявл. 11.04.2023; опубл. 18.04.2023.

13. Климов А. А. Принципы моделирования процесса заполнения путей сортировочного парка при расформировании составов / А. А. Климов // Политранспортные системы: материалы XII Международной научно-технической конференции. В 3 частях, Новосибирск, 21–22 сентября 2022 года. Часть 3. — Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 126–131.

14. Климов А. А. Анализ уклона сортировочных путей в современных условиях эксплуатации / Климов А. А. // Пятая международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, 11–13 октября 2023 г.): сборник трудов : в 2 частях / Под ред. О. С. Валинского, А. А. Краснощека, П. К. Рыбина. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. — Ч. 1. — С. 85–94.

Дата поступления: 24.04.2025

Решение о публикации: 10.05.2025

Контактная информация:

КЛИМОВ Александр Александрович — канд. техн. наук, доц.; a-aklimov@yandex.ru

Probabilistic Assessment of the Marshalling Yard Track Gradient when Implementing the Interval-Targeted Braking Mode

A. A. Klimov

Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

For citation: Klimov A. A. Probabilistic Assessment of the Marshalling Yard Track Gradient when Implementing the Interval-Targeted Braking Mode. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 430–443. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-430–443

Summary

Purpose: To establish the criteria for evaluating the track gradient in a marshalling yard when implementing the interval-targeted braking mode. The prevailing regulatory framework stipulates uniform values for the sorting track gradients across all gravity hump stations. It is important to note that each sorting hump is designed and equipped differently, and each has its own specific wagon flow. Furthermore, the meteorological conditions of different areas are unique. Consequently, the sorting track gradients should be calculated with reference to the aforementioned features for each specific gravity hump. **Methods:** The following research methods were employed: an analysis of the regulatory documents for the design of elements of the sorting track longitudinal profile; the existing numerical characteristics of the main specific resistance to the movement of wagons; and the methods for calculating the specific resistance forces acting on the wagons rolling down the gravity hump. The study of the accumulation of wagons was carried out using the method of imitation modelling of the wagon cuts rolling down the marshalling yard sorting tracks from the braking position to the stopping point. The experimental results were analyzed using the probability theory and mathematical statistics. **Results:** It has been determined that the assessment of the sorting track gradient can be conducted by determining the following indicators: the probability of uncoupled wagons being under-rolled to the designated wagon groups in the yard; the probability of wagon cuts being attached to a designated wagon group at a higher speed in the yard; and the compliance of the moving wagon cuts with the required operating conditions. The given method of estimating the sorting yard track gradient can be used for gravity humps on which the interval-targeted braking mode is implemented. The method's distinctive feature is that it does not involve the use of additional technical mechanisms along the sorting track that influence the rolling wagon cuts. The random nature of train accumulation is determined by this absence. To assess its quality, it is recommended that probabilistic indicators be used. **Practical significance:** The proposed method can be used to assess the performance of gravity humps, as well as to compare design options for the construction of new sorting yards or the reconstruction of existing ones.

Keywords: Marshalling yard track gradient, the main specific resistance to the movement of wagons, simulation modelling of sorting track filling process, the run distance of the wagon cuts, speed of wagon collision, speed regulating modes for wagon cuts rolling.

References

1. SP 119.13330.2024. SNIP 32-01-95. *Svod pravil. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm: utv. Min. stroit. i zhil.-kommun. khoz. RF, 01.07.2024, № 432/pr* [SP 119.13330.2024. SNiP 32-01-95. Code of Practice. 1520 mm Gauge Railways: approved. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 01.07.2024, № 432/pr]. (In Russian)
2. *Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznnykh dorogakh kolei 1520 mm: utv. MPS RF 10.10.03* [Rules and Standards for the Design of Marshalling Facilities on 1520 mm Gauge Railways:

approved. MPS RF 10.10.03]. Moscow: Tekhinform Publ., 2003, 168 p. (In Russian)

3. *Instruktsiya po proektirovaniyu stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh Soyuz SSR: VSN 56-78, vved. 01.01.1979, Mintransstroy SSSR, MPS SSSR* [Instructions for the Design of Stations and Junctions on Railways of the USSR: VSN 56-78, introduced 01.01.1979, USSR Ministry of Transport Construction, USSR MPS]. Moscow: Transport Publ., 1978, 175 p. (In Russian)

4. *Tekhnicheskie ukazaniya na proektirovanie stantsiy i uzlov: utv. MPS SSSR 24.11.1947, VNII zh.-d. transp.* [Technical guidelines for the design of stations and junctions: approved by the USSR MPS on 24.11.1947, VNII zh.-d. transp.]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1948, 124 p. (In Russian)

5. *Tekhnicheskie ukazaniya po proektirovaniyu stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh obshchey seti Soyuz SSR: VSN 56-61: utv. MPS SSSR 12.06.1961* [Technical guidelines for the design of stations and junctions on the railways of the common network of the USSR: VSN 56-61: approved by the USSR MPS on 12.06.1961]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1961, 151 p. (In Russian)

6. *Tekhnicheskie ukazaniya po proektirovaniyu stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh obshchey seti Soyuz SSR: izmeneniya i dopolneniya № 1: VSN 56-65: utv. MPS SSSR 30.07.1965* [Technical guidelines for the design of stations and junctions on the railways of the common network of the USSR: amendments and additions № 1: VSN 56-65: approved by the USSR MPS on 30.07.1965]. Moscow: Orgtransstroy Publ., 1965, 26 p. (In Russian)

7. Borovlev P. V. Otsenka otkloneniya profilya puti sortirovochnogo parka v rezhime real'nogo vremeni [Estimation of the deviation of the track profile of the marshalling yard in real time]. *Zheleznaya doroga: put' v budushchee: sbornik materialov I Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii aspirantov i molodykh uchenykh, Moskva, 28–29 aprelya 2022 goda* [Railway: the path to the future: collection of materials of the I International Scientific Conference of graduate students and young scientists, Moscow, April 28–29, 2022]. M.: Nauchno-issledovatel'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta Publ., 2022, pp. 300–304. (In Russian)

8. Kovalenko N. A., Borodin A. A., Tarasov K. A. Faktory, opredelyayushchie velichinu i normy zakrepleniya “bar’ernykh grupp” [Factors determining the size and standards of fixing “barrier groups”]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2019, vol. 17, Iss. 6(85), pp. 242–257. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-242-257. (In Russian)

9. Sheykin V. P., Kobzev V. A., Metel'skiy V. I. Effektivnost' sistem kvazinepreryvnogo regulirovaniya skorosti ottsepov na sortirovochnykh gorkakh s ispol'zovaniem tochechnykh vagonnykh zamestiteley [Efficiency of quasi-continuous speed control systems for uncoupled trains on hump yards using point wagon substitutes]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the All-Union Research Institute of Railway Transport]. 1992, Iss. 5, pp. 17–21. (In Russian)

10. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii: utv. prikazom Mintransa Rossii ot 23.06.2022 № 250* [Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation: approved. by order of the Ministry of Transport of Russia dated 23.06.2022 № 250]. Moscow: INFRA-M Publ., 2022, 561 p. (In Russian)

11. *Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh Soyuz SSR: VSN 207-89, MPS SSSR* [Rules and standards for the design of marshalling devices on the railways of the USSR: VSN 207-89, MPS USSR]. Moscow: Transport Publ., 1992, 104 p. (In Russian)

12. Klimov A. A., Gunbin A. A. *Programma dlya rascheta pokazateley protsessa zapolneniya putey sortirovochnogo parka* [Program for calculating the indicators of the process of filling the tracks of a marshalling yard]. Svidetel'stvo RF, no. 2023618062, 2023. (In Russian)

13. Klimov A. A. Printsipy modelirovaniya protsessa zapolneniya putey sortirovochnogo parka pri rasformirovanii sostavov [Principles of modeling the process of filling the tracks of a marshalling yard during the disbanding of trains]. *Politransportnye sistemy: materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. V 3 chastyakh, Novosibirsk, 21–22 sentyabrya 2022 goda. Chast' 3* [Polytransport systems: materials of the XII International scientific and technical conference. In 3 parts, Novosibirsk,

September 21–22, 2022. Part 3]. Novosibirsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 126–131. (In Russian)

14. Klimov A. A. Analiz uklona sortirovochnykh putey v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii [Analysis of the slope of marshalling tracks under modern operating conditions]. *Pyataya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh"* (Sankt-Peterburg, 11–13 oktyabrya 2023 g.): sbornik trudov: v 2 chastyakh; pod red. O. S. Valinskogo, A. A. Krasnoshcheka, P. K. Rybina [Fifth international scientific and practical conference

"Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems" (St. Petersburg, October 11–13, 2023): collection of papers: in 2 parts; ed. O. S. Valinsky, A. A. Krasnoshchek, P. K. Rybin]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2023, part 1, pp. 85–94. (In Russian)

Received: April 24, 2025

Accepted: May 10, 2025

Author's information:

Aleksandr A. KLIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; a-aklimov@yandex.ru