

УДК 656.212.5

В. Я. НЕГРЕЙ<sup>1\*</sup>, С. А. ПОЖИДАЕВ<sup>2\*</sup>, Е. А. ФИЛАТОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Первый проректор, каф. «Транспортные узлы», Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», ул. Кирова, 34, 246653, Гомель, Республика Беларусь, ORCID 0000-0001-6660-6265

<sup>2\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», ул. Кирова, 34, 246653, Гомель, Республика Беларусь, тел. (0232) 95-39-48, эл. почта pgsergey2006@yandex.by, ORCID 0000-0002-6929-1008

<sup>3\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», ул. Кирова, 34, 246653, Гомель, Республика Беларусь, ORCID 0000-0001-7710-3110

## ОБОСНОВАНИЕ УРОВНЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ СОРТИРОВОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

**Цель.** Целью исследования является разработка комплексного метода обоснования рациональных путей модернизации эксплуатируемых и оптимизации параметров конструкции и технического оснащения проектируемых сортировочных устройств на основе адаптивных технико-экономических расчетов и инновационных подходов к развитию станционной инфраструктуры железнодорожного транспорта. **Методика.** Решение задачи осуществлялось на основе технико-экономических расчетов по критерию экономической эффективности инвестиций. При этом по каждому разрабатываемому варианту выполняются горочные конструктивные расчеты и проверяется работоспособность полученной конструкции горки с помощью методов имитационного моделирования. **Результаты.** Апробация предложенных подходов и теоретических положений оптимизации параметров конструкции и технического оснащения сортировочных горок различных типов на объектах Белорусской железной дороги позволила сформировать основные направления стратегии развития сортировочных комплексов Белорусской железной дороги на ближайшую перспективу. Применяемые подходы позволяют учесть дополнительные затраты, связанные с переработкой вагонов на немеханизированных сортировочных горках. Вопреки сложившемуся мнению, механизация таких сортировочных горок может быть экономически целесообразна при величине переработки менее 1 000 вагонов в сутки. **Научная новизна.** Предложенный инновационный метод обоснования уровня технического оснащения и оптимизации параметров конструкции сортировочных горок на основе технико-экономических расчетов отличается комплексностью, позволяет учесть взаимосвязанность конструктивных решений и экономических показателей работы сортировочных комплексов, оптимизировать их структуру и техническое оснащение с учетом действия большого количества факторов в реальных условиях функционирования железнодорожных станций, что даёт возможность показать эффективность и расширить область применения технических средств механизации и автоматизации сортировочных процессов, в некоторых случаях даже при объёме переработки менее 1 000 вагонов в сутки и, следовательно, значительно повысить безопасность перевозочного процесса. Это позволяет реализовать в инфраструктурных проектах более дорогие, но прогрессивные технические решения. **Практическая значимость.** Использование результатов исследования позволяет значительно повысить адекватность оценки экономической эффективности вложения инвестиций в развитие сортировочных комплексов, снизить себестоимость переработки вагонов на горках, обосновать наиболее прогрессивные и безопасные проектные решения. В перспективе такой подход применим и к решению задачи концентрации сортировочной работы на полигоне железной дороги.

**Ключевые слова:** сортировочная горка, техническое оснащение сортировочных горок, перерабатывающая способность, эффективность вложения инвестиций, дисконтирование.

**Мета.** Метою дослідження є розробка комплексного методу обґрунтування раціональних шляхів модернізації експлуатуємих і оптимізації параметрів конструкції та технічного оснащення проектуємих сортувальних пристроїв на основі адаптивних техніко-економічних розрахунків та інноваційних підходів до розвитку станційної інфраструктури залізничного транспорту. **Методика.** Вирішення задачі здійснюється на основі техніко-економічних розрахунків за критерієм економічної ефективності інвестицій. При цьому за кожним розробленим варіантом виконуються гіркові конструктивні розрахунки і перевіряється роботоспроможність отриманої конструкції гірки за допомогою методів імітаційного моделювання. **Результати.** Апробация запропонованих підходів і теоретичних положень оптимізації параметрів конструкції і технічного оснащення сортувальних гірок різних типів на об'єктах Білоруської залізниці дозволила сформулювати основні напрями стратегії розвитку сортувальних комплексів Білоруської залізниці на найближчу перспективу. Запропонова-

ні підходи дозволяють врахувати додаткові витрати, пов'язані з переробкою вагонів на немеханізованих сортувальних гірках. Всупереч сформованій думці, механізація таких сортувальних гірок може бути економічно доцільна при величині переробки менш 1 000 вагонів на добу. **Наукова новизна.** Запропонований інноваційний метод обґрунтування рівня технічного оснащення та оптимізації параметрів конструкції сортувальних гірок на основі техніко-економічних розрахунків відрізняється комплексністю, дозволяє врахувати взаємозв'язок конструктивних рішень і економічних показників роботи сортувальних комплексів, оптимізувати їх структуру і технічне оснащення з урахуванням дії великої кількості факторів реальних умовах функціонування залізничних станцій, що дає можливість показати ефективність і розширити область застосування технічних засобів механізації і автоматизації сортувальних процесів, у деяких випадках навіть при обсязі переробки менш 1 000 вагонів на добу і, отже, значно підвищити безпеку перевізного процесу. Це дозволяє реалізувати в інфраструктурних проектах більш дорогі, але прогресивні технічні рішення. **Практична значимість.** Використання результатів дослідження дозволяє значно підвищити адекватність оцінки економічної ефективності вкладення інвестицій у розвиток сортувальних комплексів, знизити собівартість переробки вагонів на гірках, обґрунтувати найбільш прогресивні і безпечні проектні рішення. У перспективі такий підхід застосуємо і до вирішення задачі концентрації сортувальної роботи на полігоні залізниці.

*Ключові слова:* сортувальна гірка, технічне оснащення сортувальних гірок, переробна спроможність, ефективність вкладення інвестицій, дисконтування.

**Purpose.** The aim of this study is to develop a comprehensive method of justification of rational ways to modernize and optimize the operating parameters of the design and technical equipment designed sorting devices based on adaptive technical and economic calculations and innovative, approaches to the development of the station railway infrastructure. **Methodology.** The problem is solved on the basis of technical and economic calculations on the criterion of economic efficiency of investment. At the same time, for each options of hump execute structural calculations and checking the efficiency of the resulting construct rolling using simulation techniques. **Findings.** Testing of the proposed approaches and theoretical positions to optimize design parameters and technical equipment of sorting humps on the different types of objects Belarusian Railways allowed to form the main directions of development strategy sorting complexes Belarusian Railways in the near future. The approaches allow to take into account the additional costs associated with the processing of cars on non-mechanized humps. Contrary to popular belief, the mechanization of sorting humps can be economically feasible at a value less processing 1 000 cars per day. **Originality.** Proposed an innovative method of justifying the level of technique and optimization design parameters of sorting humps on the basis of technical and economic assessment is a complex case, allows to take into account the interconnectedness of structural solutions and economic performance of the sorting systems, optimize their structure and technical equipment with the action of a large number of factors in real operating conditions railway stations, which makes it possible to show the efficiency and expand the use of technical means of mechanization and automation of sorting processes, in some cases, even when the amount of processing at least 1 000 cars a day and thus significantly improve the safety of the transportation process. This allows you to implement infrastructure projects more expensive, but advanced technical solutions. **Practical value.** Using the results of the research can significantly increase the value of economic evaluation of investing in the development of sorting complexes, reduce the cost of recycling cars on a roller coaster, to justify the most innovative and safe design solutions. In the future, this approach is applicable to the problem of the concentration of the sorting operation at the site of the railway.

*Keywords:* hump, hump yards technical equipment, processing capacity, efficiency investments, discounting.

## Вступление

В настоящее время условия работы сортировочных горок Белорусской железной дороги значительно изменились. Проекты большинства из них разработаны более 30 лет назад, а на часть горок проектная документация отсутствует. Существенные изменения произошли как в структуре и величине перерабатываемого вагонопотока, его физических характеристиках, так и в предъявляемых требованиях к качественным показателям и безопасности сортировочных процессов. В ряде исследований по трибологии, [1], доказано, что недопустимые термомеханические повреждения колес перерабатываемого на сортировочных горках по-

движного состава при башмачном торможении можно ожидать при скоростях движения юзом даже до 1 м/с! Очевидно, что необходимо пересмотреть подходы к выбору уровня технического оснащения сортировочных устройств. Это особенно актуально, учитывая, что 20 сортировочных горок из 25 эксплуатируемых на Белорусской железной дороге являются немеханизированными либо частично механизированными и требуют модернизации. Однако считается, [2], что механизация сортировочных горок экономически целесообразна при объеме переработки только свыше 1 000 вагонов в сутки. Но при этом не учитываются особенности конструкции горки, станционные взаимосвязи, режимы работы устройства, характер перерабатываемого вагонопотока, степень дифференци-

ации его параметров. Кроме того, в результате реализации более технологичных вариантов, предусматривающих механизацию и автоматизацию процесса роспуска, возникает дополнительный эффект, обусловленный приростом перерабатывающей способности горки. Дополнительный резерв перерабатывающей способности  $\Delta R$  позволяет перераспределить сортировочную работу с наиболее загруженных объектов железнодорожной сети и не вкладывать средства в «создание дополнительной мощности» (500-800 у. е./ваг) при увеличении объемов сортировочной работы на сети. В случае сохранения либо снижения объемов сортировки прирост резерва  $\Delta R$  позволяет рассматривать вопрос о концентрации сортировочной работы на меньшем количестве станций для повышения эффективности функционирования железнодорожной сети.

В этих условиях детальные исследования вопросов оптимизации конструкции и уровня технического оснащения сортировочных горок для соответствия современным требованиям безопасности и эффективности работы становятся особенно актуальными в настоящее время.

Основным методом определения технико-эксплуатационных показателей работы сортировочных горок в настоящее время является имитационное моделирование горочных процессов на ЭВМ [3-5]

Существующие методики оптимизации по критерию экономической эффективности инвестиций ориентированы в первую очередь на пошаговый поиск оптимальной конструкции сортировочной горки. Выполненные исследования [6-9] показали, что при таком подходе слабо увязаны между собой технологические расчеты и экономические показатели проектов. Это связано, в первую очередь, с тем, что большая часть вариантов конструкции горки в случае пошагового моделирования и разработки графа вариантов являются нерациональными и не отражают реальную ситуацию. Поэтому в данном исследовании предварительно по каждому разрабатываемому варианту выполняются горочные конструктивные расчеты по требованиям [10] и проверяется работоспособность полученной конструкции горки исследуемого технического оснащения с помощью имитационного моделирования. Такой подход, соответствует современной парадигме функционального проектирования транспортных коммуникаций. Определяющим фактором является уровень механизации и автоматизации. Конструкция горки должна соответствовать заданному

уровню технического оснащения, но может потребоваться его корректировка из-за наличия технологических ограничений применения технических средств. Такая нацеленность на конкурентоспособный вариант и детальный анализ сложившихся проблем в работе горки позволяет в большинстве случаев в несколько раз сократить количество рассматриваемых вариантов (до 3 - 4): немеханизованная горка, с частичной механизацией, полной механизацией, механизацией и автоматизацией.

### **Цель**

Целью исследования является разработка комплексного метода обоснования рациональных путей модернизации эксплуатируемых и оптимизации параметров конструкции и технического оснащения проектируемых сортировочных устройств на основе адаптивных технико-экономических расчетов и инновационных подходов к развитию станционной инфраструктуры железнодорожного транспорта.

### **Методика**

Основой оптимизации технического оснащения сортировочных комплексов по приведенным затратам и оценки эффективности инвестиций являются результаты детализированного расчета капитальных вложений, эксплуатационных расходов и экономии по вариантам конструкции сортировочной горки при различном уровне её технического оснащения с учетом технологических особенностей. Причем, при усилении технического оснащения горки значительны капитальные вложения в технические средства, но сокращаются эксплуатационные расходы на переработку вагонопотока и появляется их экономия по сравнению с базовым вариантом. Базовым вариантом может являться проектная нормативная конструкция и техническое оснащение сортировочной горки, либо существующая конструкция горки и её техническое оснащение.

Капитальные вложения включают следующие статьи расходов: приведение параметров нижнего и верхнего строения сортировочной горки и сортировочно-отправочных путей к проектному очертанию; механизация тормозных позиций; автоматизация технологических процессов работы горки; приобретение дополнительного тягового подвижного состава для обеспечения осаживания вагонов в сортировочно-отправочном парке и др.

Расходы на реконструкцию земляного по-

лотна определяются как

$$A_3 = c_{3p} \cdot V_3,$$

где  $c_{3p}$  – стоимость выполнения земляных работ, рублей/м<sup>3</sup>;

$V_3$  – объем перемещаемых земляных масс, м<sup>3</sup>.

Основным методом определения объемов земляных масс является метод поперечных профилей в необходимых сечениях, что объясняется высокой точностью расчетов. В то же время это наиболее трудоемкие расчеты, поэтому для их автоматизации целесообразно использовать прикладное программное обеспечение, позволяющее получить высокую точность вычислений, например «Профиль\_v1».

Расходы на техническое оснащение при механизации тормозных позиций сортировочной горки могут включать расходы на приобретение и укладку вагонных замедлителей в необходимом количестве  $A_T$ , сооружение (модернизацию) компрессорной установки  $A_K$  и воздухопроводной сети, внедрение систем ГАЦ (МПЦ) и АРС  $A_{авт}$ , устройств системы принудительной очистки стрелочных переводов и др. Ориентировочная стоимость переоборудования ЭЦ станции системами МПЦ в пересчете на один стрелочный перевод составляет 60-70 тыс. у. е. Стоимость замедлителей колеблется от 70 до 190 тыс. у. е. за один комплект в зависимости от типа.

Данные расходы оказывают наибольшее влияние на капиталоемкость вариантов с полной или частичной механизацией сортировочной горки из-за высокой стоимости горочного оборудования. Это делает весьма актуальным вопрос рационального применения средств механизации исходя из их стоимости и мощности.

Расходы на локомотивы для осаживания в сортировочном парке определяются по формуле

$$A_{л} = c_{л} \frac{\sum T_{ос}}{T_{л}},$$

где  $c_{л}$  – стоимость локомотива, рублей;

$\sum T_{ос}$  – годовые затраты локомотиво-часов на осаживание вагонов;

$T_{л}$  – продолжительность работы локомотива в течение одного года, часов.

В реальных условиях удельный вес этих затрат существенно снижен из-за низкой остаточной стоимости эксплуатируемых маневровых локомотивов вследствие высокой степени амортизации.

Годовые затраты локомотиво-часов на осаживание вагонов связаны с выполнением осаживания в сортировочном парке со стороны горки для ликвидации окон между вагонами. Объемы этой работы зависят, главным образом, от среднего количества вагонов в осаживаемой группе, дальности пробега отцепов и порядка их скатывания с горки. Появление отцепа с тем или иным сопротивлением движению и, следовательно, с той или иной дальностью пробега, является случайным явлением, поэтому и длина осаживаемой группы  $L_{ог}$  является средней случайных величин:

$$L_{ог} = l_{п} + l_{от} \left[ \frac{1 - \alpha_{п}}{\alpha_{п}} - (1 - \alpha_{п})^{n_m} \left( \frac{1}{\alpha_{п}} - \frac{1}{\alpha_{х}} \right) \right],$$

где  $l_{п}$  – дальность пробега в сортировочный парк «плохих» бегунов, м;

$l_{от}$  – средняя длина отцепов, м;

$\alpha_{п}$ ,  $\alpha_{х}$  – соответственно, вероятности появления «плохих» и «хороших» бегунов;

$n_m$  – количество отцепов, которые могут разместиться на пути между отцепами с сопротивлением, соответственно,  $w_x$  и  $w_{п}$ .

Параметр  $L_{ог}$  может определяться на основе теории вероятностей по данным анализа натурно-сортировочных листов за период максимальных объемов работы сортировочного комплекса, либо принимается на основе требований заказчика проекта и результатов имитационного моделирования работы горки.

Величина  $n_m$  определяется как

$$n_m = (l_x - l_{п}) / l_{от},$$

где  $l_x$  – дальность пробега «хороших» бегунов.

Дальность пробега в сортировочный парк расчетных бегунов  $l_x$  и  $l_{п}$  может быть оценена по данным имитационного моделирования в зависимости от высоты горки и остаточной энергетической высоты  $\Delta h$  при климатических условиях различных периодов года:

$$l_{он} = l_{тп-рт} + \frac{\Delta h \cdot 10^3}{(\omega_0 + \omega_{св} + \omega_{ск} + \omega_{си} \pm i_c)},$$

где  $l_{тп-рт}$  – длина участка пути от конца парковой ТП до расчетной точки, м;

$\Delta h$  – остаточная энергетическая высота, эквивалентная скорости движения бегунов в расчетной точке, полученная имитационным моделированием с помощью средств САПР (pp\_sg.exe);

$\omega_0$  – основное удельное сопротивление движению расчетного бегуна, Н/кН;

$\omega_{св}$  – дополнительное сопротивление от воздушной среды и ветра при движении отцепа на

сортировочном пути, Н/кН;

$\omega_{ск}$  – дополнительное удельное сопротивление движению вагонов в кривых участках сортировочного пути, Н/кН;

$\omega_{си}$  – удельное сопротивление от снега и инея, Н/кН;

$i_c$  – средний уклон сортировочных путей, ‰.

При работе на горке одного локомотива средняя продолжительность осаживания вагонов

$$t_{oc} = \frac{1}{k_l} \left[ \frac{L_n}{L_{ог}} - 1 \right] (a_r + b_r \Delta l);$$

при  $L_{ог} \leq 0,5 L_c$   $\Delta l = L_{ог}$ , иначе  $\Delta l = (L_c - L_{ог})$ ,

где  $k_l$  – количество локомотивов, одновременно работающих на осаживании вагонов в сортировочном парке;

$L_n$  – средняя длина расформировываемых составов, м;

$L_c$  – средняя длина сортировочных путей, м;

$a_r$  – продолжительность заезда локомотива для осаживания вагонов, мин;

$b_r$  – продолжительность осаживания вагонов и возвращения локомотива, отнесенная на один метр пути, мин.

Годовые затраты локомотиво-часов на осаживание вагонов при работе сортировочной горки определяются по формуле

$$\Sigma T_{oc} = \frac{n l_{усл}}{L_n 60} \Sigma t_{oc} \lambda_t,$$

где  $n$  – количество условных вагонов, перерабатываемых горкой в сутки;

$l_{усл}$  – длина условного вагона, м;

$\lambda_t$  – количество дней в году при установленной температуре наружного воздуха.

Выполненные в БелГУТе исследования показали, что наиболее характерными являются т. н. «расчетные» месяцы года, являющиеся самыми неблагоприятными и благоприятными для работы сортировочной горки. Эти два месяца задают максимальную амплитуду колебаний количества локомотиво-часов на осаживание вагонов. Приблизительное годовое количество локомотиво-часов на осаживание вагонов рассчитывается на основе этих двух месяцев. Такой подход позволяет в несколько раз сократить трудоёмкие расчеты параметров осаживания вагонов с горки, обеспечивая погрешность не более 2-3 %.

Эксплуатационные расходы на переработку вагонопотока по вариантам конструкции сортировочной горки включают следующие основные статьи расходов: на осаживание ваго-

нов в сортировочном парке; содержание тормозных позиций; расход топлива на надвиг и роспуск составов с горки; заработная плата причастным работникам; дополнительные расходы, связанные с амортизацией и содержанием технических средств. При увеличении высоты горки возрастают эксплуатационные расходы на надвиг и роспуск составов поездов, затраты на производство сжатого воздуха для работы замедлителей, но значительно снижаются расходы на осаживание вагонов в сортировочном парке.

Расходы на осаживание вагонов в сортировочном парке  $\mathcal{E}_{oc}$

$$\mathcal{E}_{oc} = c_{oc} \Sigma T_{oc},$$

где  $c_{oc}$  – стоимость одного локомотиво-часа маневровой работы, рублей.

Наибольшее влияние на затраты, связанные с регулированием скоростей движения вагонов, оказывает степень их торможения, определяемая, в первую очередь, высотой (дальностью пробега) и профилем сортировочной горки.

Для механизированных сортировочных горок *затраты на производство сжатого воздуха* при торможении отцепов на механизированных тормозных позициях сортировочной горки можно определить по формуле

$$\mathcal{E}_B = 365 c_B N_{расф} V_B,$$

где  $c_B$  – стоимость производства 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха компрессорной установкой с учетом затрат на её техническое обслуживание, рублей;

$N_{расф}$  – среднее количество расформировываемых составов в сутки на сортировочной горке;

$V_B$  – объем сжатого воздуха, расходуемого на включение замедлителей в течение роспуска одного состава, м<sup>3</sup>.

Общий расход сжатого воздуха на работу замедлителей всех тормозных позиций горки при роспуске одного состава определяется по формуле:

$$V_B = \Pi_k \cdot t_p,$$

где  $\Pi_k$  – потребная интенсивность подачи воздуха компрессорной станцией при роспуске состава, м<sup>3</sup>/мин;

$t_p$  – продолжительность роспуска состава, мин.

$$\Pi_k = \varphi P_3,$$

$$t_p = 0,06(1 - 1/2g_0)l/v_p,$$

где  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий изменение

расхода воздуха на горке, который зависит от величины погашаемой энергетической высоты замедлителями при изменении скорости роспуска. Устанавливается с учетом высоты сортировочной горки и скорости роспуска, т.е.  $\varphi = f(H_r, v_p)$ . При общем расходе воздуха менее 60 м<sup>3</sup>/мин  $\varphi = 1,15$ ;

$P_3$  – интенсивность расхода воздуха при работе замедлителей, м<sup>3</sup>/мин;

$l_c$  – средняя длина распускаемого состава;

$v_p$  – расчётная скорость роспуска, км/ч;

$g_o$  – среднее количество отцепов в составе.

Интенсивность расхода воздуха замедлителями определяется частотой их включения за одну минуту. Расход воздуха при последовательном роспуске, м<sup>3</sup>/мин:

$$P_3 = P_1 b_1 + P_2 b_2 + P_3 b_3,$$

где  $P_1, P_2, P_3$  – расход воздуха на одно включение замедлителей, установленных на первой, второй и третьей тормозных позициях, соответственно. Величины  $P_1, P_2, P_3$  определяются в зависимости от типа используемых замедлителей и величины погашаемой ими энергетической высоты. Для замедлителей типа ЗВУ (НК114) можно принять на горочных тормозных позициях  $P_{1(2)} = 0,85$ , а на парковой  $P_3 = 0,43$  м<sup>3</sup>/включение (в случае использования однорельсового замедлителя);

$b_1, b_2, b_3$  – количество включений замедлителей в течение одной минуты на соответствующих тормозных позициях (1-ой, 2-ой горочных и парковой).

Усреднённая частота включений замедлителей, включений/мин

$$b_i = \varphi_{от} k_{вкл},$$

где  $\varphi_{от}$  – средняя интенсивность скатывания отцепов с горки в течение одной минуты, отцеп/мин;

$k_{вкл}$  – среднее количество включений каждого замедлителя на соответствующей тормозной позиции, приходящихся на один отцеп.

Средняя интенсивность скатывания отцепов с горки  $\varphi_{от}$  зависит от средней длины расформировываемого состава, среднего количества вагонов в отцепе  $n_b$  и скорости роспуска  $v_p$ . При среднем количестве отцепов в составе  $g_o$  ориентировочно

$$\varphi_{от} = g_o / t_p, \text{ отцеп/мин.}$$

Среднее количество включений замедлителя, приходящихся на один отцеп, зависит от количества вагонов в отцепе  $n_b$ . Если на одиночный вагон потребуется не более одного

( $\varphi_{от} = 1$ ), то для длинных отцепов количество включений замедлителя может потребоваться 2 и более. Количество включений  $k_{вкл}$  на разных тормозных позициях при  $n_b = 2$  приведено в табл. 1 (табл. П.6.1 [10]).

Таблица 1

**Зависимость количества включений на разных тормозных позициях при 2 вагонах в отцепе**

Тип горки	Средняя скорость роспуска на горке, км/ч	Среднее количество включений замедлителей, $k_{вкл}$		
		1ТП	2ТП	3ТП
Механизированная с двумя тормозными позициями	Менее 4	1,6	1,92	-
	4-6	1,8	2,08	-
	Более 6	1,92	1,6	-
Механизированная с тремя тормозными позициями	Менее 4	1,8	2,08	1,92
	4-6	1,92	2,16	2,0
	Более 6	2,08	2,32	2,08

Если фактическое среднее количество вагонов в отцепе  $n_{вф}$  на конкретной горке отличается от  $n_b = 2$ , то  $k_{вкл}$  необходимо умножить на коэффициент пропорциональности

$$k_{пр} = 0,7 + 0,15 n_{вф}.$$

Для немеханизированных сортировочных горок расходы на содержание немеханизированных (башмачных) тормозных позиций  $\mathcal{E}_t$  определяются интенсивностью износа тормозных башмаков по вариантам конструкции сортировочной горки, которая принимается конгруэнтно существующему положению

$$\mathcal{E}_t = c_{тб} N_{тб},$$

где  $c_{тб}$  – стоимость одного горочного тормозного башмака, рублей;

$N_{тб}$  – количество тормозных башмаков, изнашиваемых за год на сортировочной горке в процессе эксплуатации.

Кроме того, необходимо учесть расходы на ремонт подвижного состава, замену рельсов и башмакосбрасывателей, изнашиваемых в процессе движения вагонов юзом при башмачном торможении. Расходы на замену башмакосбрасывателей

$$\mathcal{E}_{тс} = c_{сб} N_{сб},$$

где  $c_{сб}$  – стоимость одного башмакосбрасывателя и одновременно заменяемых рельсов, рублей;

$N_{сб}$  – среднее количество башмакосбрасывателей, изнашиваемых на сортировочной горке в процессе эксплуатации за год.

Изменение расходов, связанных с подачей составов на горб горки, определяется расходом

условного топлива по следующему выражению:

$$\mathcal{E}_{\text{ГД}} = 365 c_{\text{т}} \frac{2,35 Q_{\text{п}} H_{\text{к}} \cdot n_{\text{ваг}} l_{\text{ус}}}{7000 \cdot 10^3 \eta L_{\text{п}}},$$

где  $Q_{\text{п}}$  – масса поезда, т;

$H_{\text{к}}$  – высота горки по варианту конструкции и технического оснащения;

$n_{\text{ваг}}$  – среднесуточная переработка вагонов на горке;

$L_{\text{п}}$  – средняя длина состава, надвигаемого на горку, м;

2,35 – количество килокалорий, соответствующее работе в 1 000 кгм;

7 000 – теплотворная способность условного топлива в ккал/кг;

$\eta$  – результирующий коэффициент полезного действия механизмов локомотива;

$c_{\text{т}}$  – стоимость одной тонны топлива, руб/т.

Расходы на заработную плату причастным работникам сортировочного комплекса определяются их численностью и квалификацией

$$\mathcal{E}_{\text{ЗП}} = c_{\text{ЗП}} N_{\text{р}},$$

где  $c_{\text{ЗП}}$  – средняя зарплата одного работника в месяц с учетом коэффициента замещения и норм отчисления на социальное страхование, рублей;

$N_{\text{р}}$  – количество штатных работников, человек.

При сохранении башмачных средств регулирования скоростей скатывания отцепов с горки учитываются расходы на заработную плату регулировщикам скоростей скатывания отцепов с горки. Внедрение механизации предусматривает дополнительное привлечение специалистов для обслуживания тормозного оборудования и штат операторов торможения вагонов. Однако это позволяет частично, либо полностью сократить значительный штат регулировщиков скорости движения отцепов, занятых на тормозных позициях, и существенно повысить безопасность труда. Оборудование сортировочной горки микропроцессорной системой автоматизации расформирования составов также потребует дополнительно привлечение специалистов.

Дополнительные эксплуатационные расходы, связанные с амортизацией и содержанием технических средств  $\Sigma C_{\text{доп(экспл)}}$  включают амортизационные отчисления на технические средства и затраты на материалы, запчасти и электроэнергию, связанные с обеспечением функционирования системы. Амортизационные отчисления  $C_A$  по проектируемым техническим

устройствам определяются на основании величин капитальных вложений  $A_{\text{м}}$  и норм амортизации, которые могут приниматься с учетом срока службы оборудования.

Экономия эксплуатационных расходов при совершенствовании конструкции и уровня технического оснащения сортировочной горки обуславливается, главным образом, за счет сокращения продолжительности расформирования составов с горки; ускорения процесса накопления составов и сокращения расхода топлива на маневровые передвижения.

Дополнительная экономия эксплуатационных расходов, связанная с уменьшением продолжительности расформирования составов, складывается из экономии вагоно-часов простоя подвижного состава на станции ( $C_1$ ) и локомотиво-часов работы маневровых локомотивов ( $C_2$ ).

Экономия эксплуатационных расходов, получаемая в результате уменьшения вагоно-часов простоя подвижного состава на станции, определяется по следующему выражению:

$$C_1 = 365 \Delta t_{\text{Г}} e_{\text{в-ч}} n_{\text{ваг}},$$

где  $\Delta t_{\text{Г}}$  – сокращение величины горочного технологического интервала при усилении технического оснащения сортировочной горки, час;

$e_{\text{в-ч}}$  – стоимость вагоно-часа простоя подвижного часа на станции;

$n_{\text{ваг}}$  – количество вагонов перерабатываемых в среднем за сутки.

Уменьшение затрат на маневровую работу за счет сокращения продолжительности расформирования составов на горке  $C_2$  определяется по следующей зависимости:

$$C_2 = 365 \frac{\Delta t_{\text{Г}}}{60} N e_{\text{л-ч}}^{\text{ман}},$$

где  $N$  – количество расформировываемых составов, в среднем в сутки;

$e_{\text{л-ч}}^{\text{ман}}$  – стоимость локомотиво-часа маневровой работы, рублей.

Уровень технического оснащения сортировочной горки влияет на сокращение продолжительности поступления на путь накопления замыкающей группы вагонов в составе поезда и, как следствие, уменьшение простоя вагонов под накоплением на состав и экономию эксплуатационных расходов  $C_3$

$$C_3 = 365 \frac{\Delta t_{\text{Г}}}{60 n_{\text{отц}}} n_{\text{ваг}} e_{\text{в-ч}},$$

где  $n_{\text{отц}}$  – среднее количество отцепов в рас-

формировываемых составах в сутки.

Стоимость сэкономленного топлива за год в результате сокращения горочного технологического интервала определяется по формуле:

$$C_T = 365 (r_H - r_{XX}) N \frac{\Delta t_{\Gamma}}{60} e_T,$$

где  $r_H$  – расход условного топлива при номинальной нагрузке и средней скорости маневровой работы 15 км/ч, кг/час;

$r_{XX}$  – расход условного топлива в режиме холостого хода, кг/час;

$e_T$  – стоимость 1 кг топлива, рублей.

Основным фактором, определяющим отличие данных показателей по вариантам, является горочный технологический интервал, который зависит, главным образом, от уровня оснащённости сортировочной горки.

Определение оптимального варианта конструкции горки выполняется на основе сравнения приведенных годовых затрат по вариантам и сроков их окупаемости. Приведенные годовые затраты

$$E_{пр} = \mathcal{E} + E_n \cdot K,$$

где  $\mathcal{E}$  – эксплуатационные расходы, руб/год;

$E_n$  – нормативный коэффициент приведения капитальных вложений к эксплуатационным расходам,  $E_n = 0,10-0,12$ ;

$K$  – капитальные вложения по варианту, рублей.

Следует отметить, что в расчетах целесообразно учитывать только капитальные вложения, изменяющиеся по вариантам конструкции горки, не учитывая вложения, одинаковые для всех вариантов.

Срок окупаемости мероприятий при использовании собственных средств железнодорожных компаний для оптимального проектного варианта сортировочной горки

$$T_3 = \frac{K}{\mathcal{E}_\Phi},$$

где  $\mathcal{E}_\Phi$  – экономический эффект от внедрения оптимального варианта, руб/год.

Экономический эффект  $\mathcal{E}_\Phi$  при реализации оптимального варианта определяется как разность эксплуатационных расходов для горки нормативной конструкции  $\mathcal{E}_n$  или при существующем положении  $\mathcal{E}_{сущ}$  и после модернизации  $\mathcal{E}_{опт}$  с учетом экономии эксплуатационных расходов  $C_{опт}$

$$\mathcal{E}_\Phi = \mathcal{E}_{н(сущ)} - \mathcal{E}_{опт} + C_{опт}.$$

Экономический эффект может включать

только экономию эксплуатационных расходов от внедрения современных технических средств за вычетом дополнительных годовых расходов на их содержание.

Период возврата инвестиций составит

$$T_B = \frac{K}{\mathcal{E}_\Phi + A},$$

где  $A$  – амортизационные отчисления, зависящие от срока эксплуатации технических средств (20-25 лет) по оптимальному варианту.

Коэффициент эффективности инвестиций рассчитывается как

$$E_{инв} = \frac{\mathcal{E}_\Phi}{K}.$$

Значение данного коэффициента не должно быть ниже нормативного  $E_n$ , принимаемого равным  $E_n = 0,10-0,12$  при сроке окупаемости реконструктивных мероприятий 8-10 лет. Учитывая, что срок службы устанавливаемого оборудования может превышать 20 лет, нормативный срок окупаемости может быть увеличен. Если  $E_{инв} \geq E_n$ , то вложение инвестиций в усиление технического оснащения сортировочной горки является экономически целесообразным и эффективным.

Следует отметить, что срок окупаемости проектных мероприятий и период возврата инвестиций могут удовлетворять нормативным для нескольких вариантов конструкции горки. Тогда в качестве принимаемого может быть рекомендован наиболее высокотехнологичный вариант конструкции, особенно при росте величины перерабатываемого вагонопотока на сортировочной горке в перспективе. Выбор окончательного варианта из экономически целесообразных следует осуществлять по усмотрению заказчика для реализации решений Генеральной схемы развития сети и железнодорожных узлов, планов развития основных производственных мощностей региона тяготения, а также этапности выполнения работ.

При привлечении заёмных средств для реализации вариантов развития сортировочного комплекса станции целесообразно эффект от реализации инвестиционного проекта рассчитывать по периодам времени, что связано с необходимостью учета величины ставки рефинансирования и банковских рисков, уплаты процентов. Распределение эффекта по времени в расчетный период определяется нормативом экономической эффективности (нормой дисконта), зависящим от ставки рефинансирования или депозитного процента по вкладам (в ста-



бильных ценах). Определённым ориентиром при установлении норматива экономической эффективности может служить депозитный процент по вкладам в относительно стабильной иностранной валюте с учетом инфляции и соответствующих банковских рисков. Учитывая, что ОАО «РЖД» является крупным перевозчиком грузов, а также значительную экономическую интеграцию стран в рамках Союзного государства, Таможенного союза и ЕЭП в качестве норматива экономической эффективности (дисконта) можно принять величину депозитного процента по вкладам в российских рублях, например,  $E = 9\%$ , что, как правило, соответствует прогнозируемому уровню инфляции и темпу амортизационных отчислений по проекту.

Для оценки эффективности инвестиций с использованием заемных средств рассчитываются: индекс рентабельности инвестиций, величина чистого дисконтированного дохода и финансовое положение инвестора, период возврата инвестиций, а также внутренняя норма рентабельности, [11].

Индекс рентабельности инвестиций определяется отношением экономического эффекта  $\mathcal{E}_\Phi$  к сумме инвестиционных затрат  $K$  при норме дисконта  $E$ , который должен быть больше единицы.

Величина чистого дисконтированного дохода для постоянной нормы дисконта (интегральный эффект) только при неизменных ценах в течение расчетного периода  $T_p$  определяется из выражения

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \sum_{T=0}^{T_p} (\mathcal{E}_\Phi - K) \frac{1}{(1 + E)^T}.$$

Норма рентабельности определяется методом последовательного приближения из тождества

$$\sum_{T=0}^{T_p} (K - \mathcal{E}_\Phi) \frac{1}{(1 + E_{\text{вн}})^T} = 0.$$

Внутренняя норма рентабельности инвестиций  $E_{\text{вн}}$  представляет собой коэффициент дисконтирования, при котором величина экономического эффекта  $\mathcal{E}_\Phi$ , приведенная к одному и тому же временному интервалу, соответствует приведенным капитальным вложениям  $K$ .

Соотношение  $\mathcal{E}_\Phi$  и  $K$  с учетом нормы рентабельности (дисконта) характеризует граничное положение, разделяющее инвестиции на «приемлемые» и «неприемлемые» при заданном расчетном периоде.

При изменении нормы дисконта, а также других показателей экономической эффективности рассматриваемых вариантов конструкции горки в течение рассчитанного срока полученный период возврата инвестиций может существенно измениться.

## Результаты

На рис. 1 показано образование зоны рациональных решений для выбора оптимального варианта конструкции и технического оснащения сортировочной горки.

Поведение трендов на графике определяет изменение приведенных расходов по вариантам конструкции горки (1 – нормативная конструкция без механизации, 2 – частичная механизация, 3 – полная механизация, 4 – механизация и автоматизация). Дополнительная вариантность образуется изменением высоты горки в зоне рациональных решений.

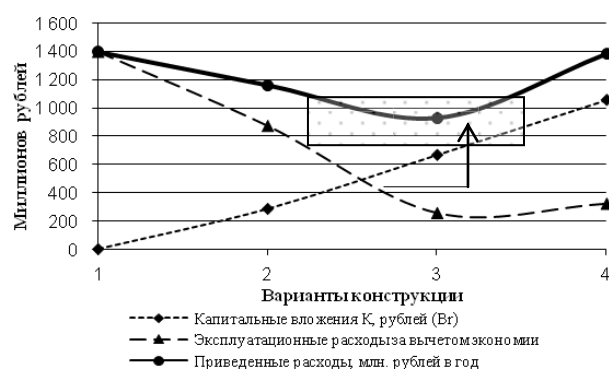


Рис. 1. Поиск оптимального варианта конструкции и технического оснащения горки

В результате исследования целесообразности модернизации 20 существующих немеханизированных и частично механизированных сортировочных горок Белорусской железной дороги, выполненного на основе предложенных подходов и теоретических положений, установлено, что даже при объемах работы сортировочных горок малой мощности менее 1000 ваг/сутки, экономически целесообразным может оказаться вариант полной механизации горки (рисунок 1), а оборудование её системами автоматизации работы ГАЦ (МПС) АРС (и др.) – приемлемым при обоснованных оценках эффективности (станции Жлобин, Лида, Кричев-1, Осиповичи-1, Степянка, Слуцк). Это обусловлено во многом сокращением штата регулировщиков скорости движения отцепов с горки, снижением количества браков в работе, повышением эффективности и безопасности технологических процессов.

## Научная новизна и практическая значимость

В работе предложен инновационный метод оптимизации структуры и технического оснащения сортировочных комплексов железнодорожных станций, адаптированный к реальным условиям их функционирования, развивающий парадигму функционального проектирования и развития инфраструктуры железнодорожного транспорта и позволяющий повысить адекватность обоснования параметров конструкции и технического оснащения сортировочных горок при различных объемах переработки вагонов для повышения безопасности перевозочного процесса. Учет значительного количества факторов в реальных условиях функционирования станций даёт возможность оценить эффективность и расширить традиционные сферы применения средств механизации и автоматизации сортировочных процессов даже при относительно небольших объемах переработки.

### Выводы

Рассмотренные подходы отличаются высокой степенью адаптивности к реальным условиям функционирования сортировочных устройств, учетом большого количества факторов, взаимосвязанностью конструктивных расчетов и экономических изысканий, позволяют обосновать экономически выгодную и технологически рациональную этапность модернизации сортировочных комплексов, которые должны удовлетворять современным требованиям, повысить уровень концентрации и безопасности выполнения сортировочной работы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов [Текст] : монография / Б. М. Асташкевич, И. Н. Воронин, Л. А. Вуколов [и др.]; Под ред. С. М. Захарова. – Москва : Интекст, 2004. – 160 с.
2. Муха, Ю. А. Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств [Текст] / Муха Ю. А. [и др.]. – Москва: Транспорт, 1994. – 220 с.
3. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко [и др.]. – Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2012. – 236 с.

4. Козаченко, Д. М. Дослідження допустимих режимів гальмування відцепів на сортувальних гірках [Текст] / Д. М. Козаченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2013. – № 4/3(64). – С. 25-28.

5. Козаченко, Д. Н. Исследование условий интервального регулирования скорости скатывания отцепов на автоматизированных горках [Текст] / Д. Н. Козаченко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 46-50.

6. Анализ конструкций эксплуатируемых сортировочных горок станций Орша-Центральная, Волковыск и Лида Белорусской железной дороги и разработка рекомендаций по совершенствованию их параметров и повышению безопасности роспуска составов [Текст] : Отчет о НИР: 4401 / Белорус. гос. ун-т трансп.; рук. В. Я. Негрей; исполн.: С. А. Пожидаев, Е. А. Филатов [и др.]. – Гомель, 2007. – 302 с. – № ГР 20065000.

7. Анализ конструкции сортировочной горки станции Лунинец Белорусской железной дороги и разработка технико-экономического обоснования необходимости реконструкции [Текст] : Отчет о НИР: 1068 (5535) / Белорус. гос. ун-т трансп.; рук. С. А. Пожидаев исполн.: Е. А. Филатов [и др.]. – Гомель, 2009. – 131 с. – № ГР 20082017.

8. Обоснование параметров конструкции и технического оснащения сортировочной горки станции Кричев Белорусской железной дороги [Текст] : Отчет о НИР: 1491 (6559) / Белорус. гос. ун-т трансп.; рук. С. А. Пожидаев, исполн.: В. А. Подкопаев, Е. А. Филатов [и др.]. – Гомель, 2010. – 165 с.

9. Обследование конструкции и технического оснащения сортировочной горки станции Жлобин с оптимизацией её параметров [Текст] : Отчет о НИР: 3090 (7266) / Белорус. гос. ун-т трансп.; рук. С. А. Пожидаев, исполн.: Е. А. Филатов [и др.]. – Гомель, 2011. – 161 с.

10. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. [Текст]. – Москва: Техноинформ, 2003. – 169 с.

11. Оценка эффективности инвестиций и конкурентоспособности транспортно-логистической системы: учеб.-метод. пособие / И. А. Еловой, И. А. Лебедева. – Гомель: БелГУТ, 2009. – 99 с.

*Статья рекомендована к публикации д.э.н., проф. Еловым И. А. (Республика Беларусь)*

Поступила в редколлегию 17.12.2014.

Принята к печати 21.12.2014.