

УДК 656.212.5

С. А. ПОЖИДАЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта;  
Ю. К. КИРИЛЛО, комендантура военных сообщений железнодорожного участка и станции, г. Гомель

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАДВИЖНОЙ ЧАСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Приведены методические и теоретические положения по выбору оптимальных параметров подвижной части сортировочной горки, расчету топливных затрат на надвиг маневровых составов, дан практический пример расчета для существующей станции.

Динамика развития отраслей железнодорожного транспорта, совершенствование подвижного состава требуют постоянного анализа и выбора рационального типа и сочетания элементов продольного профиля сортировочных станций на основе минимальных эксплуатационно-строительных затрат на маневровую работу во взаимосвязи с конструкцией сортировочных устройств.

Для эффективной и безопасной работы сортировочной станции особое значение имеет продольный профиль, который должен обеспечивать сокращение времени и облегчение условий надвига составов на горку, осаживания вагонов в сортировочном парке, улучшение использования мощности маневровых локомотивов и сокращение энергетических затрат на маневровые операции. Так, на Белорусской железной дороге ежегодно расходуется около 250 тыс. т дизельного топлива (15 % от общего расхода топлива транспортным комплексом Республики Беларусь), причем на маневровую работу на станциях затрачивается 15–20 % от этого объема.

Анализ литературы показывает, что при проектировании подвижных частей сортировочных горок основное внимание уделяется техническим и технологическим критериям (обеспечение трогания состава с места и сжатия сцепных устройств), при этом не уделяется внимание критерию энергоэффективности проектов [1, 2]; для увеличения энергоэффективности маневровой работы применяются технологические приемы варьирования скоростей маневровых передвижений без внесения конструктивных изменений, что не дает достаточной эффективности; при расчетах энергозатрат не учитывается работа локомотивов с изменением режимов движения [3–5], а также изменение массы и длины состава в процессе роспуска [6]. Поэтому важным аспектом при рассмотрении процесса надвига является учет факта, что маневровый состав нельзя рассматривать как материальную точку, а выделять в нем систему взаимодействующих элементов, локомотива и вагонов [7].

Для комплексного выбора оптимального продольного профиля сортировочной станции необходимо определить влияние уклонов и длин элементов профиля на условия движения поезда: продолжительность движения, энергетические затраты с учё-

том закрепления составов на путях станции. При выборе оптимальной конструкции профиля станции учитывается дополнительное сопротивление движению от кривых и стрелочных переводов, возможность нахождения состава на нескольких элементах профиля одновременно, то есть процесс движения, соответствующий реальным условиям.

Важными критериями оптимизации профиля подвижной части сортировочной горки выступают энергетические затраты на надвиг составов поездов. Для их определения производится имитационное моделирование процесса надвига по вариантам профиля и плана подвижных путей. Объектом моделирования является состав поезда с приводящим его в движение локомотивом в определенных условиях движения. Исходными данными для моделирования являются параметры плана и профиля путей надвига (уклоны и длины элементов профиля, углы поворота и радиусы круговых кривых, количество стрелочных переводов и их параметры), состав поезда, для которого производится расчёт топливных затрат (масса и длина состава, доля гружёных вагонов), характеристики используемых в маневровой работе локомотивов (тяговые характеристики и часовой расход топлива для различных режимов движения). Ограничениями модели являются максимальная скорость роспуска, обеспечивающая безопасность скатывания отцепов и работы расцепщиков вагонов, предельная сила тяги локомотива, необходимая для приведения состава поезда в движение, преодоления сил сопротивлений движению и надвиг с заданной скоростью. Результатами моделирования выступают затраты топлива маневровыми локомотивами на надвиг составов.

Поскольку в процессе надвига и роспуска происходит изменение длины и массы состава поезда, он разбивается на элементы, при этом неделимым элементом состава является вагон. Путь надвига можно рассматривать как стек с входом в месте нахождения локомотива перед началом процесса надвига и с выходом на перевальной части сортировочной горки. В начальный момент времени весь состав поезда находится в его пределах, в процессе движения вагоны, выходящие из стека, исключаются из расчета. Продвижение состава на длину вагона с заданной скоростью надвига и роспуска будет являться шагом моделирования.

В основу модели движения поезда (маневрового состава) положено дифференциальное уравнение [6, 7]

$$f(v) - w_o(v) - w_{тр} - w_{кр}(v) - w_{сн}(v) - w_i(s) - b_r(v) - \frac{1}{\Psi} \frac{d^2s}{dt^2} = 0, \quad (1)$$

где  $f(v)$  – удельная сила тяги локомотива, Н/кН;  $w_o(v)$  – основное удельное сопротивление движению подвижного состава, Н/кН;  $w_{тр}(v)$  – дополнительное удельное сопротивление при трогании состава с места, Н/кН;  $w_{кр}(v)$  – дополнительное удельное сопротивление, возникающее при движении по кривым, Н/кН;  $w_{сн}(v)$  – дополнительное удельное сопротивление, возникающее при движении по стрелочным переводам, Н/кН;  $w_i(s)$  – дополнительное сопротивление, возникающее при движении по одному или нескольким элементам профиля различного уклона, Н/кН;  $b_r(v)$  – удельное значение тормозных усилий, Н/кН.

Необходимо отметить, что используемая модель является достаточно открытой для включения в нее дополнительных компонентов, позволяющих точнее описывать реальные условия работы за счет учета вероятностной природы действия сил сопротивлений движению, нелинейной конструкции профиля пути, влияния аэродинамики состава на сопротивление движению, нелинейной аппроксимации тяговых характеристик маневровых локомотивов и учета их износа, метеорологических условий и других факторов.

Данный подход позволяет моделировать различные режимы движения маневрового поезда при надвиге состава на сортировочную горку: разгон-движение по инерции; разгон-торможение; разгон-движение с установленной скоростью и др. С точки зрения обеспечения минимума расхода топлива, наиболее экономичным является разгон и движение поезда в полурейсе надвига со скоростью, равной установленной скорости роспуска. В этом случае надвиг производится без выбега (движения по инерции), все время с тягой и на малой скорости, что, однако, вызывает большие затраты времени и снижает производительность горки. Рассмотрим детально данный режим работы.

На каждом шаге моделирования определяются силы сопротивления движению каждого вагона и локомотива, с учетом нахождения их в пределах разных элементов плана и профиля. Суммируя вышеуказанные силы, определяется потребная сила тяги для передвижения состава. С использованием тяговой характеристики устанавливается режим движения локомотива и в зависимости от него – часовой расход топлива.

Расчет энергетических затрат следует выполнять в следующей последовательности.

Определяется основное удельное сопротивление движению вагонов, Н/кН, по формулам:

порожние –

$$w''_{oj} = 1,0 + 0,044v + 0,00024v^2; \quad (2)$$

груженные –

$$w''_{oj} = 0,7 + \frac{30 + v + 0,025v^2}{q_{oj}}, \quad (3)$$

где  $j$  – номер вагона в составе;  $v$  – скорость, с которой осуществляется движение состава, км/ч;  $q_{oj}$  – осевая нагрузка  $j$ -го вагона, кН,

$$q_{oj} = \frac{q_j}{n_{oj}}, \quad (4)$$

где  $q_j$  – вес брутто  $j$ -го вагона, кН;  $n_{oj}$  – количество осей  $j$ -го вагона.

Определяется основное удельное сопротивление движению маневрового локомотива, Н/кН:

$$w'_o = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2. \quad (5)$$

Дополнительное удельное сопротивление при прохождении  $j$ -м вагоном или локомотивом стрелочного перевода, Н/кН,

$$w_{стрj} = \frac{v^2(0,56 + 0,23\alpha_{пер})}{12,96l_{пер}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{пер}$  – угол поворота в пределах переводной кривой стрелочного перевода, град; 12,96 – коэффициент для перевода км/ч в м/с;  $l_{пер}$  – длина стрелочного перевода, м.

Дополнительное удельное сопротивление при прохождении  $j$ -м вагоном или локомотивом кривой, Н/кН,

$$w_{крj} = \frac{0,0177v^2\alpha_{кр}}{l_{кр}}, \quad (7)$$

где  $\alpha_{кр}$  – угол поворота круговой кривой в пределах длины вагона, град;  $l$  – длина кривой, м.

Для каждого вагона определяется необходимая сила тяги для его передвижения, Н:

$$F_j = q_j(w''_{oj} + w_{стрj} + w_{крj} + i_{pj}); \quad (8)$$

для локомотива, Н,

$$F_l = P(w'_o + w_{стрj} + w_{крj} + i_{pj}), \quad (9)$$

где  $P$  – вес локомотива, кН;  $i_{pj}$  – уклон на  $j$ -м участке, ‰;

Суммарная потребная сила тяги на  $i$ -м шаге, Н,

$$F_i = \sum_{j=1}^m F_j + F_l, \quad (10)$$

где  $m$  – количество вагонов в составе.

В зависимости от потребной силы тяги для обеспечения постоянной скорости движения по тяговой характеристике маневрового локомотива ([5]) определяется позиция контроллера машиниста. Затем, в зависимости от позиции контроллера, устанавливается часовой расход топлива локомотивом  $g_{чи}$ , кг/ч [5]. Расход топлива на  $i$ -м шаге

$$g_i = g_{чи} \frac{l_b}{1000v}, \quad (11)$$

где  $l_b$  – длина вагона, м.

Общий расход топлива на маневровые передвижения определяется суммированием значений  $g_i$ , полученных на каждом шаге моделирования.

Алгоритм расчета энергетических затрат с использованием формул (2)–(11) приведен на рисунке 1.

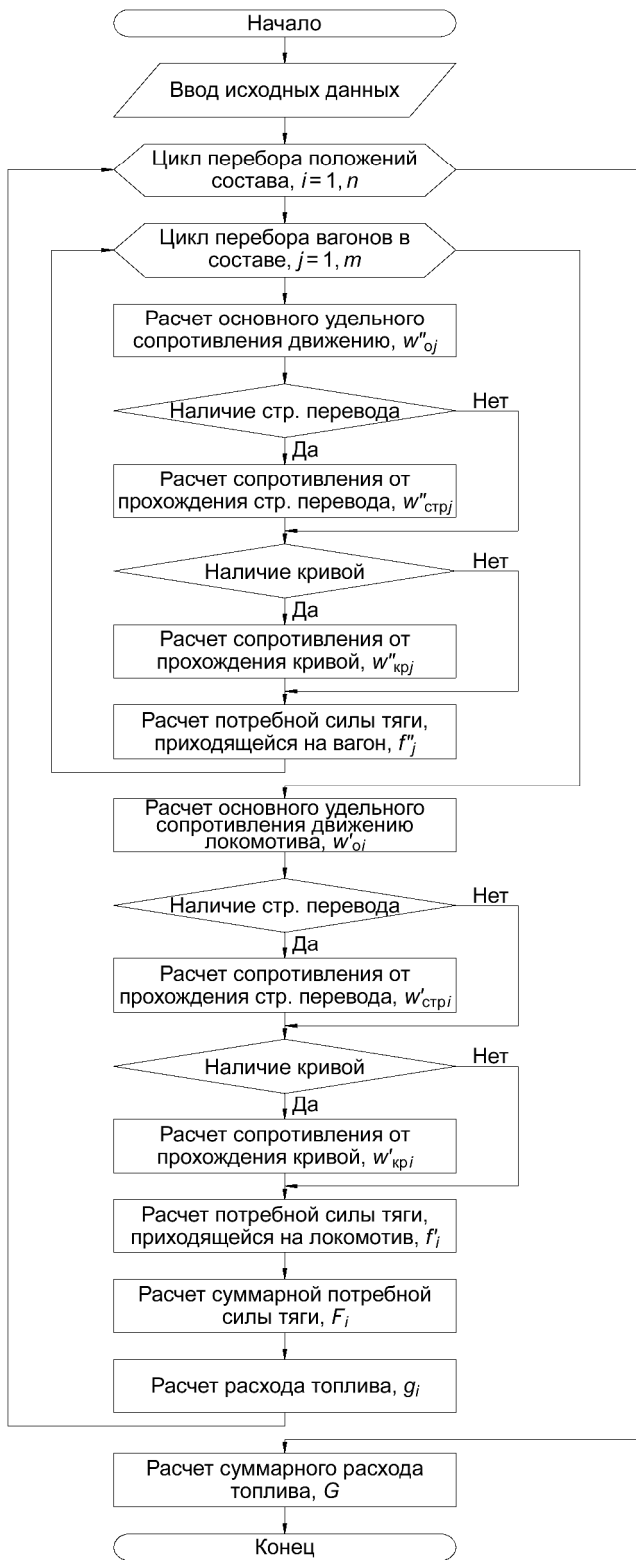


Рисунок 1 – Алгоритм расчета расхода топлива

Расчет тяговой характеристики маневрового локомотива ЧМЭ-3 для различных позиций производится по методике, приведенной в [3]. Для автономных тепловозов с электрической передачей зависимость силы тяги  $F_k$  от скорости  $v$  имеет вид

$$F_k = 0,367 \eta_d \eta_z \frac{I_r U_r}{v}, \quad (12)$$

где  $\eta_d$  – коэффициент, учитывающий потери мощности в тяговых электродвигателях;  $\eta_z$  – коэффициент, учитывающий потери мощности в зубчатой передаче;  $I_r, U_r$  – сила тока и напряжение, вырабатываемые генератором.

Тяговая характеристика маневрового теплового локомотива ЧМЭ-3, рассчитанная на основании исходных данных [8], приведена на рисунке 2.

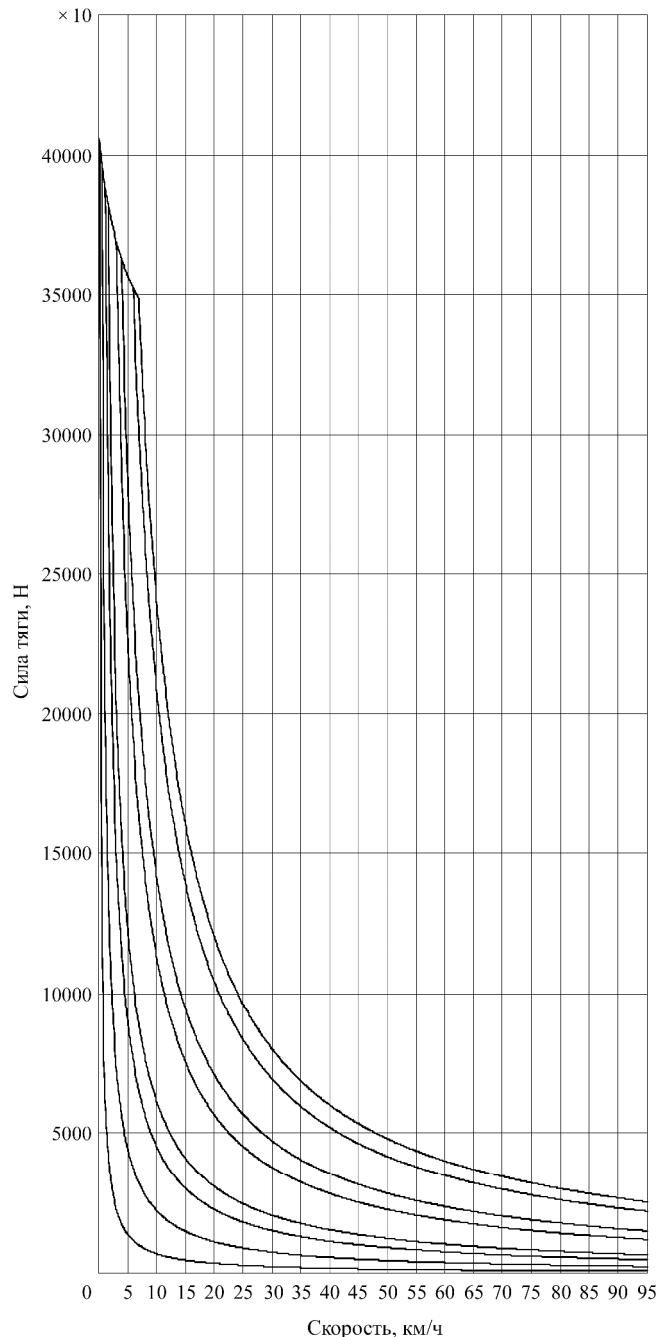


Рисунок 2 – Расчетная сила тяги для локомотива ЧМЭ-3

Для определения оптимального профиля надвижных путей разрабатывается множество вариантов подвижной части горки. Они должны обеспечивать трогание с места состава, остановивше-

гося в неблагоприятных условиях, и сжатие сцепных приборов, обеспечивающее расцепку вагонов.

Предложенная методика использовалась для определения варианта реконструкции путей Западного парка станции Барановичи-Центральные [9]. Для расчетов использована выборка из 300 составов расформированных поездов, план и профиль существующих путей, маневровый локомотив серии ЧМЭ-3, характеристики которого приведены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1 – Зависимость расхода топлива от позиции контроллера машиниста

Позиция контроллера	1	2	3	4
Часовой расход топлива, кг/ч	15,31	27,68	44,37	56,50
Позиция контроллера	5	6	7	8
Часовой расход топлива, кг/ч	96,63	124,44	187,14	226,08

Результаты расчета расхода топлива по каждому составу для условий Западного парка станции и исходного продольного профиля приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Статистическая оценка затрат топлива на надвиг составов по исходному варианту

Показатель расхода топлива	Номер пути								По всему парку
	81	82	83	84	85	86	87	88	
Выборочное среднее, кг	2,81	2,97	2,90	2,67	2,71	2,97	3,08	2,88	2,87
Выборочная дисперсия, кг <sup>2</sup>	0,53	0,65	0,61	0,50	0,51	0,56	0,66	0,51	0,58
Среднеквадратичное отклонение, кг	0,73	0,81	0,78	0,71	0,71	0,75	0,81	0,71	0,76
Максимум, кг	4,25	4,40	4,29	4,35	4,44	4,46	4,72	4,49	4,72
Минимум, кг	1,47	1,47	1,47	1,38	1,33	1,56	1,59	1,57	1,33

Средний расход топлива на надвиг одного состава при существующем профиле надвижных путей составил 2,87 кг.

Проектный профиль «привязывается» к существующему по двум точкам: горбу горки с отметкой 195,75 м и стрелочному переводу с отметкой

192,53 м. Проектный участок разбивается на три основных элемента: надвижной путь (длиной 93,9 м), стрелочная горловина (247,5 м) и путь приема (1921,5 м). Разработано несколько конкурентных вариантов переустройства, три из которых представлены на рисунках 3–5.

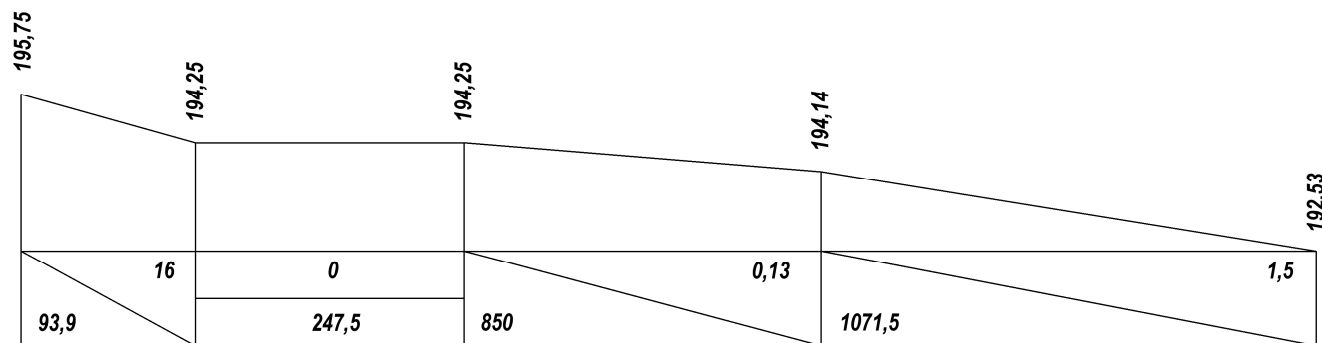


Рисунок 3 – I вариант переустройства парка приема

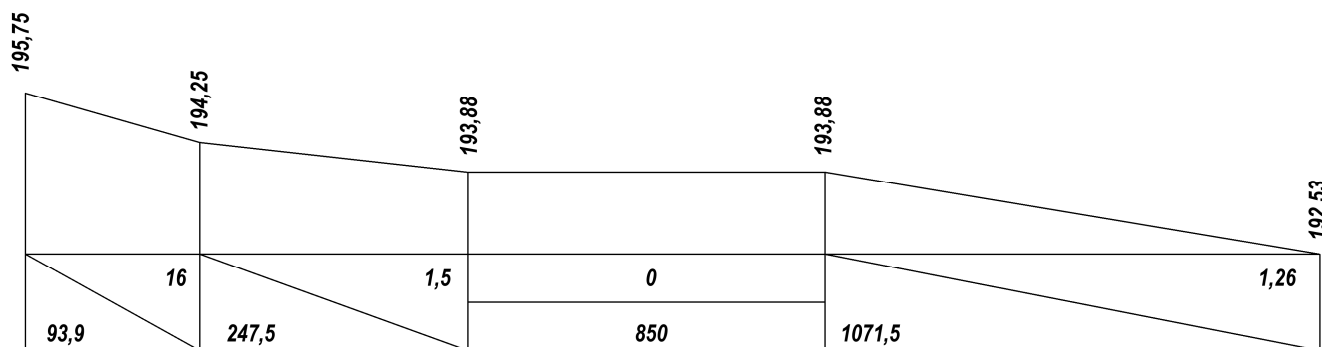


Рисунок 4 – II вариант переустройства парка приема

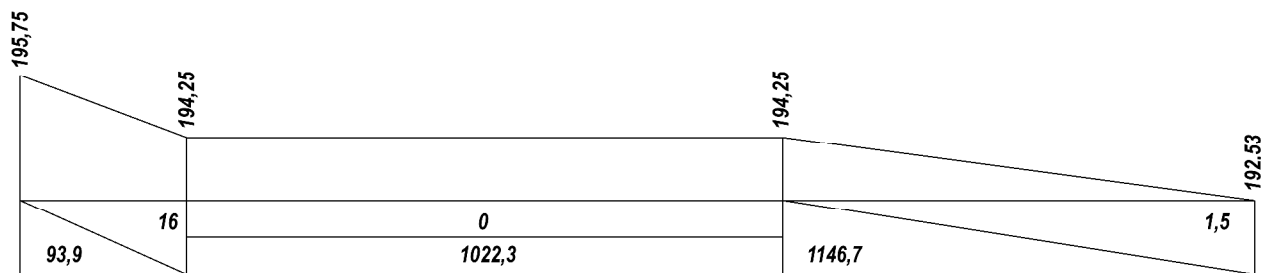


Рисунок 5 – III вариант переустройства парка приема

Результаты расчета расхода топлива по каждому составу по вариантам переустройства (таблица 3) показывают, что наилучшим является III вариант переустройства, для которого средний расход топлива на

надвиг составит 2,61 кг. Экономия топлива может составить в среднем около 9,0 % на каждой операции или в перспективе более 6,0 т в год. Ожидаемый экономический эффект – свыше 18 млн руб./год.

Таблица 3 – Статистическая оценка затрат топлива на надвиг составов по вариантам переустройства

В килограммах

Показатель расхода топлива	Номер пути								По всему парку
	81	82	83	84	85	86	87	88	
I вариант									
Выборочное среднее	2,54	2,54	2,56	2,47	2,52	2,78	2,80	2,85	2,68
Среднеквадратичное отклонение	0,66	0,66	0,67	0,62	0,64	0,70	0,71	0,73	0,70
Максимум	3,54	3,54	3,54	3,53	3,51	3,91	3,91	3,88	4,03
Минимум	1,19	1,19	1,19	1,12	1,16	1,28	1,28	1,29	1,12
II вариант									
Выборочное среднее	2,70	2,70	2,72	2,62	2,68	2,92	2,95	2,99	2,83
Среднеквадратичное отклонение	0,68	0,67	0,68	0,65	0,66	0,72	0,72	0,73	0,71
Максимум	3,87	3,91	3,91	3,81	3,91	4,19	4,22	4,31	4,31
Минимум	1,23	1,26	1,23	1,22	1,23	1,35	1,31	1,32	1,22
III вариант									
Выборочное среднее	2,47	2,47	2,49	2,40	2,45	2,72	2,75	2,78	2,61
Среднеквадратичное отклонение	0,63	0,63	0,64	0,60	0,62	0,69	0,70	0,71	0,68
Максимум	3,51	3,51	3,51	3,39	3,51	3,76	3,79	3,88	3,88
Минимум	1,19	1,19	1,19	1,12	1,16	1,28	1,28	1,29	1,12

Реализация модели процесса надвига составов на сортировочную горку дает возможность оценить «вклад» конструкции плана и продольного профиля проектируемых подсистем и эксплуатируемых сортировочных станций в энергоемкость перевозочного процесса, оптимизировать параметры этих конструкций по энергетическому критерию на основе технико-экономических расчетов.

Приведенная методика положена в основу компьютерной программы, которая и применена для расчета энергетических затрат на надвиг и роспуск составов на сортировочной горке станции Барановичи-Центральные.

#### Список литературы

- 1 Луговцов, М. Н. Проектирование железнодорожных станций и узлов : учеб. пособие / М. Н. Луговцов, В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 159 с.
- 2 Луговцов, М. Н. Сортировочные станции : учеб. пособие / М. Н. Луговцов [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 159 с.

- 3 Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М. : Маршрут, 2005. – 448 с.

- 4 Осипов, С. И. Основы тяги поездов / С. И. Осипов, С. С. Осипов. – М. : УМК МПС России, 2000. – 292 с.

- 5 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.

- 6 Мацкель, С. С. Расчет элементов станций на ЭВМ / С. С. Мацкель. – М. : Транспорт, 1980. – 176 с.

- 7 Пожидаев, С. А. Моделирование маневровых передвижений при выборе оптимальных конструкций подсистем сортировочных станций / С. А. Пожидаев, Ю. В. Ненахов, Ю. К. Кирило // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2008. – С. 84–86.

- 8 Нотик, З. Х. Тепловозы ЧМЭ-3, ЧМЭ-3Т, ЧМЭ-3Э / З. Х. Нотик. – М. : Транспорт, 1996. – 444 с.

- 9 Разработка ТЭО развития станции Барановичи-Центральные : отчет о НИР : 5254 / Белорус. гос. ун-т трансп.; рук. С. А. Пожидаев; исполн. В. А. Подкопаев [и др.]. – Гомель, 2009. – 276 с. – Библиогр. : с. 276. – № ГР 2008156.

Получено 15.12.2010

**S. A. Pozhidayev, Y. K. Kiryla.** Optimisation of parameters sliding part to a hump yard.

Methodical and theoretical positions for choice optimum parameters sliding part to a hump yard, calculation of fuel expenses on nappe shunting structures are resulted, the practical example of calculation for existing station is set.