

## Список литературы

- 1 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
- 2 **Бабичков, А. М.** Тяга поездов / А. М. Бабичков, В. Ф. Егорченко. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – 288 с.

Получено 04.10.2006

**S. V. Negrey.** Probabilistic models in the theory of traction calculations.

In the study the problems of the application of probabilistic models in the theory of transportation process are considered. It has been shown that numerous parameters that influence the basic specific resistance to traffic are of probabilistic nature. Some analytic relations that take into account the probabilistic nature of axial load are offered for the calculation of the basic specific resistance. The value of the relative error of the basic specific resistance calculation under different laws of axial load distribution has been studied.

3 **Молярчук, В. С.** Теоретические основы методики нормирования топлива и электроэнергии для тяговых средств транспорта / В. С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1996. – 264 с.

4 **Правдин, Н. В.** Взаимодействие различных видов транспорта (примеры и расчеты) / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев. – М. : Транспорт, 1989. – 208 с.

**Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2007. № 1–2(14–15)**

УДК 656.222

*В. М. КРИВЦОВА, младший научный сотрудник, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

## ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ И ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ НА НАПРАВЛЕНИЯХ

Рассматриваются вопросы определения оптимальной скорости движения поезда. Поставленная задача заключается в таком распределении скоростей движения грузовых и пассажирских поездов по участкам магистрали, при котором достигается минимум расходов. В рассматриваемой экономико-математической модели учитываются затраты времени на перемещение и энергетических ресурсов на преодоление основного удельного сопротивления, зависящих от скорости движения поезда. Предлагается для расчета оптимальной скорости учитывать колебание ряда параметров перевозочного процесса по направлениям, в частности, осевой нагрузки, величины состава, доли порожних вагонов в составе. Исследована величина относительной ошибки расчета оптимальной скорости движения с использованием установленной среднеставочной ставки поезда-часа. Приведена оценка экономической эффективности применения предлагаемой модели расчета для отдельных участков Брестского отделения Белорусской железной дороги.

**В** современных условиях одним из ключевых направлений совершенствования организации перевозочного процесса является оптимизация скоростей движения грузовых и пассажирских поездов, которые в значительной мере определяют экономические показатели работы Белорусской железной дороги. В частности, увеличение скорости движения приводит к росту энергозатрат на тягу поезда, расходов на ремонт, однако сокращает расходы, связанные с содержанием подвижного состава, работой поездных бригад и других, а при дополнительных мерах позволяет сократить удельный расход топлива на тягу поездов и повысить в целом эффективность перевозочного процесса.

Исследование вопросов оптимизации скоростей движения поездов и поиск оптимальных решений проводилось в тесной взаимосвязи с существующими экономическими и техническими факторами. Так, расходы, связанные с тягой вагонов, следует рассчитывать не по усредненным ставкам удельного расхода топлива (электроэнергии) на 10000 т км брутто, а по индивидуальному расчету механической работы на тягу поезда. В общем ви-

де характер зависимости расходов от скорости движения поезда описывается уравнением

$$E = e_{п.ч} \frac{S}{v_{уч}} + e_3 A, \quad (1)$$

где  $e_{п.ч}$  – стоимость поезда-часа, р.;  $S$  – длина участка, км;  $v_{уч}$  – участковая скорость движения пассажирского поезда, км/ч;  $e_3$  – стоимость 1 кВт·ч, р.;  $A$  – расход энергии на тягу поезда,

$$A = \frac{(P + Q)g}{3600\eta} (w_0 + i_3) S; \quad (2)$$

$P$  – масса локомотива, т;  $Q$  – масса поезда, т;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>; 3600 – переводной коэффициент (Дж в кВт ч);  $\eta$  – коэффициент полезного действия локомотива;  $w_0$  – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/кН;  $i_3$  – эквивалентный уклон, ‰.

Основное удельное сопротивление движению вагонов на роликовых подшипниках ( $q_0 > 6$  т) определяется по следующей принципиальной зависимости [1]:

$$w_0^g = a_{гр} \frac{b_{гр} + c_{гр}v + d_{гр}v^2}{q_0}, \quad (3)$$

где  $a_{гр}$ ,  $b_{гр}$ ,  $c_{гр}$ ,  $d_{гр}$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа верхнего строения пути;  $q_0$  – масса, приходящаяся на ось колесной пары, т.

Для порожних вагонов на роликовых подшипниках ( $q_0 < 6$  т)

$$w_0^g = b_{пор} + c_{пор}v + d_{пор}v^2, \quad (4)$$

где  $b_{пор}$ ,  $c_{пор}$ ,  $d_{пор}$  – эмпирические коэффициенты, которые устанавливаются опытным путем.

Сопротивление движению состава из груженых и порожних вагонов

$$w_0 = \alpha_n w_0^n + \alpha_{гр} w_0^{гр}, \quad (5)$$

где  $\alpha_n$ ,  $\alpha_{гр}$  – соответственно доля порожних и груженых вагонов в составе поезда;  $\alpha_n + \alpha_{гр} = 1$ .

После некоторых преобразований

$$w_0 = A' + B'v + C'v^2, \quad (6)$$

где  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  – расчетные коэффициенты.

Из (6) следует важный вывод о том, что в составе поезда из порожних и груженых вагонов сопротивление движению описывается параболической зависимостью.

Основное удельное сопротивление движению поезда

$$w_0^n = A + Bv + Cv^2, \quad (7)$$

где

$$A = \frac{QA' + Pa_{л.}}{Q + P}; \quad B = \frac{QB' + Pb_{л.}}{Q + P};$$

$$C = \frac{QC' + Pc_{л.}}{Q + P}. \quad (8)$$

откуда оптимальная скорость движения поезда, при которой суммарные расходы на передвижение минимальны,

$$v_{опт} = \sqrt[3]{-\left(\frac{B^3}{216C^3} + \frac{1800\eta e_{п-ч}}{2e_3(P+Q)gC\beta_{уч}}\right) + \left(\frac{B^3}{216C^3} + \frac{1800\eta e_{п-ч}}{2e_3(P+Q)gC\beta_{уч}}\right)^2 + \left(\frac{B^2}{36C^2}\right)^3} +$$

$$+ \sqrt[3]{-\left(\frac{B^3}{216C^3} + \frac{1800\eta e_{п-ч}}{2e_3(P+Q)gC\beta_{уч}}\right) - \left(\frac{B^3}{216C^3} + \frac{1800\eta e_{п-ч}}{2e_3(P+Q)gC\beta_{уч}}\right)^2 + \left(-\frac{B^2}{36C^2}\right)^3 - \frac{B}{6C}}. \quad (14)$$

Для оценки параметра стоимости поезд-часа в предлагаемой модели используется не среднестроительная, а расчетная ставка на 1 поезд-км, в состав которой включаются затраты по следующим калькуляционным измерителям: вагоно-километры, вагоно-часы, вагоно-часы в движении, тепло-

После подстановки (7) и (2) в (1) окончательно получено

$$E = e_{п-ч} \frac{S}{v\beta_{уч}} + e_3 \frac{(P+Q)g}{3600\eta} (A + Bv + Cv^2 + i_3)S, \quad (9)$$

где  $\beta_{уч}$  – коэффициент отношения участковой скорости к технической.

В выражении (6) не учитываются затраты энергетических ресурсов на преодоление дополнительного сопротивления от кривых. В действующих «Правилах тяговых расчетов для поездной работы» эти затраты не зависят от скорости движения (хотя это и противоречит существу процесса), и поэтому в данной экономико-математической модели они опущены.

Для нахождения минимума выражения (6) функция дифференцируется:

$$\frac{\partial E}{\partial v} = -\frac{e_{п-ч}S}{v^2\beta_{уч}} + \frac{e_3(P+Q)gS(B+2Cv)}{3600\eta}, \quad (10)$$

$$\frac{2e_3(P+Q)gCS\beta_{уч}}{3600\eta} v^3 +$$

$$+ \frac{e_3(P+Q)gBS\beta_{уч}}{3600\eta} v^2 - e_{п-ч}S = 0, \quad (11)$$

и после ряда подстановок и преобразований выражения (8) получим неполное кубическое уравнение вида

$$x^3 + px + q = 0. \quad (12)$$

Решение такого уравнения возможно с помощью формулы Кардано [3]

$$x = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, \quad (13)$$

возо(электровозо)-километры, тепловозо(электровозо)-часы, бригадо-часы локомотивных бригад, тонно-километры брутто вагонов и локомотивов, килограммы условного топлива и не включаются издержки, связанные со вспомогательным линейным пробегом локомотивов (таблица 1).

Таблица 1 – Расчёт укрупнённой расходной ставки на 1 поезд-км при тепловозной тяге

Измеритель	Расходная ставка, р.	Расчетная формула величины измерителя
Вагоно-километр	8,4	$m$
Вагоно-час	942,0	$m/v_{уч}$
Тепловозо-километр	1145,0	$1 + K$
Тепловозо-час	5842,0	$1/v_{уч} + K$
Бригадо-час лок. бригады	17677,0	$1/v_{уч} + 1,5$
Килограммы усл. топлива	847,2	$q_T Q / 10000 + q_T^{np} K$
Тонно-километр брутто	1,2	$P + Q$

В качестве примера приведены результаты исследований (таблица 2, рисунок 1), выполненных для участков Брестского отделения с электрической (Брест – Барановичи) и тепловозной (Брест – Лунинец) тягой, структура вагонопотока которых имеет существенные различия в четном и нечетном направлениях.

Таблица 2 – Исходные данные и результаты оптимизационных расчетов, выполненных для отдельных участков Брестского отделения (грузовое движение)

Параметры	Брест – Барановичи		Брест – Лунинец	
	нечетное направление	четное направление	нечетное направление	четное направление
Стоимость поездочаса, р.	618319	618319	680032	680032
Стоимость 1 кВт-ч, р.	130	130	130	130
Техническая скорость, км/ч	69,48	68,11	45,16	44,23
Участковая скорость, км/ч	68,6	67,93	42,14	39,22
Масса поезда, т	3860	2170	4125	2165
Осевая нагрузка, т/ось	16,07	9,15	17,38	8,56
Доля порожних вагонов в составе	0,148	0,758	0,232	0,726
Доля груженых вагонов в составе	0,852	0,242	0,768	0,274
Количество вагонов в составе, ваг.	60,1	66,6	59,3	63,3
Коэффициент участковой скорости	0,987	0,997	0,933	0,887
Оптимальная техническая скорость, км/ч	63,49	60,51	62,38	63,67
Расчетная стоимость поездочаса, руб.	779700	521682	849660	510660
Расчетная оптимальная скорость, км/ч	69,36	56,37	68,04	56,57
Относительная погрешность определения оптимальной скорости по усредненной расходной ставке поездочаса, %	8,5	7,3	8,3	12,6

Как видно из таблицы 2, расчетная оптимальная скорость редко соответствует оптимальной скорости при усредненной расходной ставке поездочаса. Это связано с тем, что структура вагонопотока на участках значительно различается, и приведение всех показателей к средним по дороге приводит к значительным неточностям при расчетах. Можно отметить, что вследствие меньшей энергоёмкости перевозки на электрифицированных направлениях наибольшие погрешности наблюдаются на участках с тепловозной тягой.

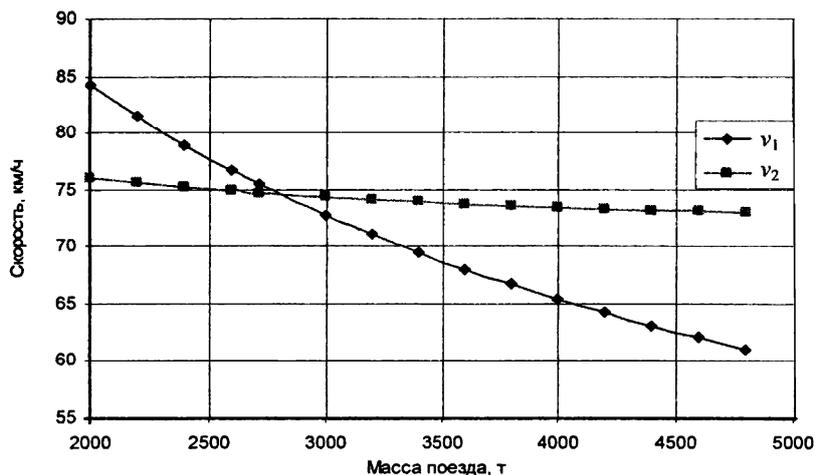
Анализ поведения функции оптимальной скорости движения поезда при изменении таких параметров перевозочного процесса, как количество вагонов в составе и осевая нагрузка, позволяет, в частности, сделать следующие выводы:

1 Зависимость оптимальной скорости от массы поезда описывается параболой (см. рисунок 1).

2 При сохранении структуры поездопотока на направлении (доли порожних вагонов и средней осевой нагрузки) увеличение массы состава, как и следовало ожидать, влечет за собой увеличение затрат на перемещение, однако минимум функции расходов, зависящих от скорости движения поезда, достигается при достаточно определенной технической скорости. Так, при расчетной ставке поездочаса изменение ее величины не превышает 5 км/ч при увеличении массы поезда более чем в два раза (см. рисунок 1, а, кривая  $v_2$ ). Использование же среднedorожной ставки ведет к тому, что величина оптимальной скорости резко уменьшается, будучи завышенной для поездов с небольшой массой состава и заниженной при массе более 3000 т (как видно из рисунка 1, а, кривая  $v_1$  относительно величина погрешности в зависимости от массы поезда может достигать 17 %).

3 При сохранении постоянной величины состава на направлении увеличение массы достигается (до определенного предела) за счет увеличения в составе доли груженых вагонов и, соответственно, средней осевой нагрузки. При этом увеличение массы состава также влечет за собой увеличение затрат на перемещение, однако минимум функции расходов достигается при увеличении технической скорости, изменение которой описывается параболической зависимостью. Из рисунка 1, б, кривая  $v_2$ , видно, что увеличение массы состава с 2000 до 5000 т при постоянной величине состава, равной 60 вагонов, вызывает необходимость в повышении технической скорости поезда с 61 до 95 км/ч. Использование при оптимизации среднedorожной ставки поездочаса ведет к получению относительной погрешности расчета, достигающей 14 %.

a)



б)

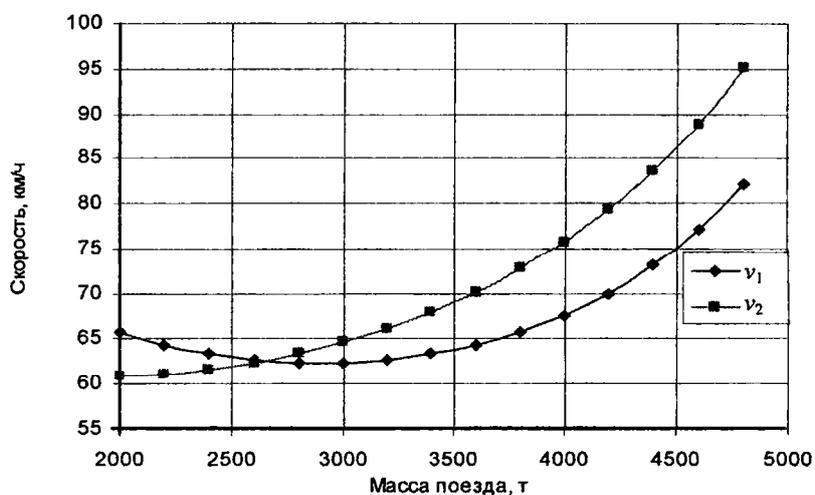


Рисунок 1 – Динамика изменения оптимальной скорости грузового поезда

(грузовые вагоны, бесстыковой путь, кривая  $v_1$  – при среднedorожной ставке поезда-часа,  $v_2$  – при расчетной ставке поезда-часа):  
 а – увеличение массы поезда вызывается увеличением количества вагонов в его составе при неизменной осевой нагрузке;  
 б – увеличение массы поезда вызывается увеличением осевой нагрузки вагонов при неизменной величине состава

4 Анализ поведения функции оптимальной скорости движения пассажирского поезда позволяет сделать заключение о том, что зависимость оптимальной скорости от массы (количества вагонов) пассажирского поезда также описывается параболой. При этом увеличение массы состава, как и следовало ожидать, влечет за собой увеличение затрат на перемещение, однако минимум функции расходов, зависящих от скорости движения поезда, достигается при некотором (в пределах 5 км/ч) снижении технической скорости. Рекомендуемая оптимальная скорость движения пассажирских поездов по различным участкам Брестского отделения при расчетной ставке поезда-часа колеблется в пределах от 93 км/ч (участок Лунинец - Брест, 13 вагонов в составе) до 98 км/ч (Брест - Барановичи, поезда дальнего следования «Полонез», 17 вагонов в составе). При этом

относительная погрешность расчета оптимальной технической скорости по существующей методике составляет от 0,3 % (Лунинец - Брест) до 3 % (Брест - Барановичи, поезда дальнего следования «Полонез»).

5 Рекомендуемая оптимальная скорость движения транзитных грузовых поездов колеблется в пределах от 56 км/ч (участки Брест - Барановичи и Брест - Лунинец, четное направление, масса поезда 2170 и 2165 т соответственно) до 69 км/ч (Брест - Барановичи, нечетное направление, масса поезда 3860 т). При этом относительная погрешность расчета оптимальной технической скорости по существующей методике составляет от 7 % (Брест - Барановичи, четное направление) до 13 % (Брест - Лунинец, четное направление). Произведенный анализ позволяет сделать вывод, что применение единых ставок для Белорусской железной

дороги приводит к существенным погрешностям, вследствие чего принимаемые решения не являются оптимальными.

6 Исследование поведения функции оптимальной скорости при изменении осевой нагрузки (рисунок 2) позволяет утверждать, что скрытым резервом экономии топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов является повышение средней осевой нагрузки. Очевидно, что увеличение осевой нагрузки при сохранении массы

грузового поезда (и, соответственно, при его меньшей длине) влечет за собой необходимость повышать скорость движения для достижения минимума расходов.

7 Анализ структуры вагонопотока за 2004 год на различных направлениях Белорусской железной дороги и, в частности, на двух участках Брестского отделения (таблица 3), позволил произвести оценку экономической эффективности применения предлагаемой модели расчета.

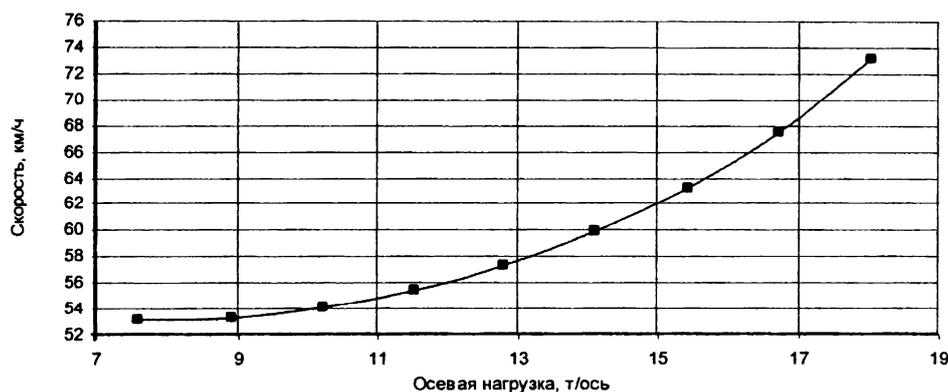


Рисунок 2 – Динамика изменения оптимальной скорости грузового поезда в зависимости от средней осевой нагрузки

Таблица 3 – Оценка годовой экономической эффективности модели расчета

Категория поезда	Годовая экономическая эффективность, тыс. р., по участкам			
	Брест – Лунинец		Брест – Барановичи	
	нечётное направление	чётное направление	нечётное направление	чётное направление
Грузовые	271491,5	660376,7	1291552,5	615295,1
Пассажирские	366494,1	366494,1		
В том числе: дальние			28761,3	28761,3
скорые			197183,2	197183,2
местные			149282,1	149282,1
Итого по участкам	637985,6	1026870,8	1666779,1	990521,7
Всего	1664856,4		2657300,8	

В настоящее время проводится также исследование вопросов оптимизации скоростей движения поездов и поиск оптимальных решений с учетом того, что многие параметры перевозочного процесса, влияющие на основное удельное сопротивление движению, и, в частности, осевая нагрузка, носят вероятностный характер.

#### Список литературы

- 1 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
- 2 Правдин, Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин., М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 247 с.
- 3 Вентцель, Е. С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Радио и связь. – 1983. – 416 с.
- 4 Анализ эксплуатационной работы Белорусской железной дороги за 1991-2000 гг. – Мн. : Бел. ж. д., 2001. – 81 с.

Получено 16.10.2006

**V. M. Krivtsova.** Optimization of traffic speed of cargo and passenger trains on railway directions.

In the study the problems of the definition of optimum traffic speed of a train are considered. The put task consists in such distribution of traffic speeds trains on different sites of a highway, at which total charges are minimal. In suggested economic-mathematical model the expenses of time for moving and power resources on overcoming of the basic specific resistance to traffic, dependent on speed of a train, are taken into account. It is offered to take into account for calculation of optimum speed fluctuation of many parameters of transportation process on directions, in particular, axial load, size of the train, a share of empty cars in structure. The value of the relative error of the optimum traffic speed calculation with use established value of train-hour rate has been studied. The estimation of an economic efficiency of application of offered account model is given for separate directions of the Brest branch of the Byelorussian railway.