

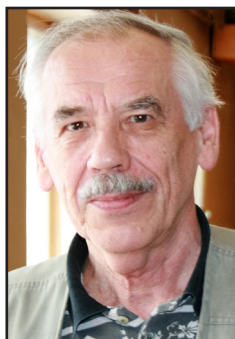


Об эффективности использования автономных локомотивов на железных дорогах Монголии



Бурэн-Итгэл ГАНТУМУР
Buren-Itgel GANTUMUR

Владимир ПРЕЧИССКИЙ
Vladimir A. PRECHISSKY



Михаил СЛЕПЦОВ
Mikhail A. SLEPTSOV

Артем БАРАТ
Artem A. BARAT



On the Efficiency of Using Autonomous Locomotives on the Railways of Mongolia

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 106)

Требования быстроты, надежности, безопасности и экономической эффективности грузоперевозок ставят перед Уланбаторской железной дорогой (УБЖД) ряд сложных логистических задач, включая выбор оптимальной массы поезда, серии и числа секций локомотива для ведения грузового поезда заданного веса. Выбранная в ходе исследования масса поезда проверялась по условию трогания с места на расчётном подъёме. На основе анализа продольного профиля пути составлена расчётная схема профиля. Вычислением минимальной силы тяги локомотива задавалась масса поезда, серия и число секций. При помощи диаграмм удельной замедляющей и ускоряющей сил была построена кривая скорости движения поезда методом А. И. Липеца, после чего методом Г. В. Лебедева найдено полное время движения поезда и время работы ТЭД в различных режимах, что позволяет найти удельный расход топлива. После рассмотрения трех возможных вариантов установлено, что комбинация локомотивов 2ТЭ116УМ-2ЗАГАЛ позволяет организовать более быстрые и экономичные грузоперевозки. Учитывая оснащённость УБЖД этими локомотивами, предлагаемая в статье идея может быть реализована на наиболее грузонапряжённых участках.

Ключевые слова: железная дорога, локомотив, Монголия, оптимизация грузоперевозок, расчеты, эффективность.

Гантумур Бурэн-Итгэл – аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Россия / Улан-Батор, Монголия. Пречисский Владимир Антонович – доктор технических наук, профессор НИУ «МЭИ», Москва, Россия. Слепцов Михаил Александрович – кандидат технических наук, профессор НИУ «МЭИ», Москва, Россия. Барат Артем Александрович – старший преподаватель НИУ «МЭИ», Москва, Россия.

В связи с прогнозируемым ростом монгольской экономики возникает необходимость решения сложных логистических задач в масштабах страны. Актуальным, в частности, становится выбор локомотива, соответствующего комплексу требований, в том числе таких, как минимизация времени перевозки, соблюдение скоростей движения, обеспечивающих безопасность во внештатных ситуациях, определение оптимального удельного расхода топлива. В данном исследовании на основе анализа продольного профиля пути на наиболее грузонапряжённом участке движения Толгойт–Чойр выбраны оптимальные параметры массы поезда, серии и числа секций локомотива для ведения грузового поезда заданного веса. Для каж-

Задаваемые исходные параметры сравниваемых серий локомотивов

№ п/п	Основные параметры локомотивов	Серии локомотивов	
		1-й вариант	2-й вариант
		4ТЭ116УМ	2ТЭ116УМ – 2ZAGAL
1.	Эффективная мощность (мощность длительного режима), кВт	5300	5287
2.	Число секций	4	4
3.	Расчётная сила тяги, Н	1460	1430
4.	Расчётная скорость, км/ч	24,4	24,4
5.	Конструкционная скорость, км/ч	100	100
6.	Расчётный вес, кН	5520	5364

дого из предложенных вариантов найдены показатели относительной эффективности и выработаны рекомендации по эксплуатации.

1. МЕТОДИКА РАСЧЁТА

Вычисление показателей эффективности эксплуатации различных локомотивов основано на следующей стандартной методике. На начальном этапе следует изучить продольный профиль исследуемого участка пути (в рассматриваемом примере Толгойт–Чойр, данные предоставлены Уланбаторской железной дорогой – УБЖД). Расчётная схема профиля получается благодаря группировке сходных элементов и замене кривых участков пути фиктивными подъёмами. Затем, задаваясь массой поезда, надо выбрать серию и число секций локомотива на основе вычисления минимальной силы тяги локомотива для ведения грузового поезда установленного веса по расчётному подъёму с расчётной постоянной скоростью [6]:

$$F_{K \min} = Q \cdot (\omega_0 + i_p) \cdot \left(\frac{q+1}{q} \right), \quad (1)$$

где Q – вес грузового состава поезда, кН; i_p – крутизна расчётного подъёма; q – отношение веса состава поезда к весу локомотив. Основное удельное сопротивление движению поезда ω_0 определяется из (2):

$$\omega_0 = \frac{\omega'_0 + q\omega''_0}{1+q}. \quad (2)$$

Величины ω'_0 , ω''_0 , характеризующие основное удельное сопротивление движению локомотива и грузового состава, соответственно берутся из [1, 7] для расчётной скорости $v_p = 24$ км/ч. Минимально необходимая для ведения поезда мощность находится по формуле [6]:

$$N_{K \min} = \frac{F_{K \min} \cdot v_p}{3600}. \quad (3)$$

По величинам $F_{K \min}$ или $N_{K \min}$ можно выбрать серии локомотивов с соответствующим числом секций и расчётными параметрами не ниже минимально необходимых. Расчётные параметры таких серий представлены в таблице 1.

После того, как выбран тип и количество секций локомотива, следует провести тяговый расчёт равнодействующих сил при основных режимах движения: тяге, полном служебном торможении и холостом ходе. Эмпирические формулы, по которым проводились вычисления сил в зависимости от скорости движения, заимствованы из [2].

Удельная ускоряющая сила (в режиме тяги) [1] является функцией скорости и может быть найдена согласно выражению:

$$f(v) = f_K - \omega_{\phi}, \quad (4)$$

где $f_K = \frac{F_K}{P+Q}$ – удельная сила тяги (P – вес

локомотива, Q – вес поезда). Удельная замедляющая сила (тормозной режим) [1] находится как

$$f(v) = 0,5b_T + \omega_{0X}. \quad (5)$$

Здесь $b_T = 270 \frac{v+100}{5v+100} \cdot v_p$ – удельная тормозная сила;

$\omega_{0X} = \frac{\omega'_X \cdot P + \omega''_0 \cdot Q}{P+Q}$ – удельная замедляющая сила в режиме холостого хода.

Основное удельное сопротивление движению подвижного состава в режиме холостого хода: $w'_x = 2,4 + 0,011 v + 0,00035 v^2$. В режиме экстренного торможения удельная замедляющая сила [6] вычисляется согласно выражению



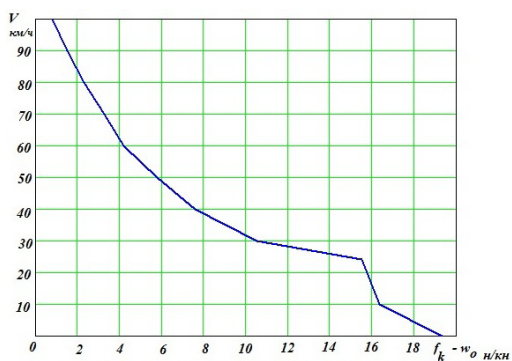


Рис. 1а. Удельная ускоряющая сила (в режиме тяги) 4ТЭ116УМ.



Рис. 2а. Удельная ускоряющая сила (в режиме тяги) 2ТЭ116УМ-23АГАЛ.

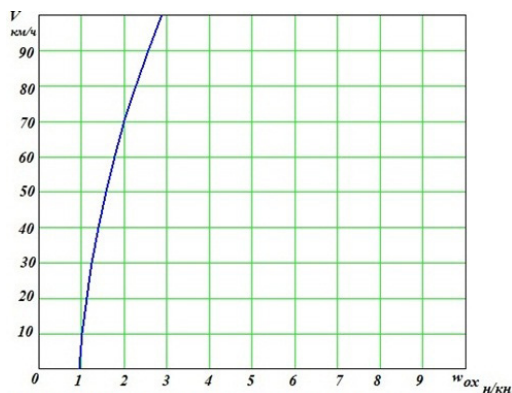


Рис. 1б. Удельная замедляющая сила (в режиме холостого хода) 4ТЭ116УМ.

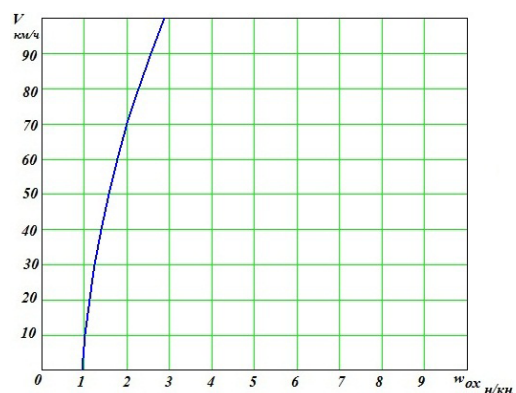


Рис. 2б. Удельная замедляющая сила (в режиме холостого хода) 2ТЭ116УМ-23АГАЛ.

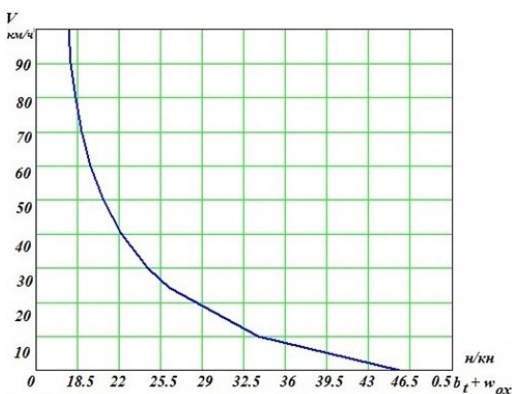


Рис. 1в. Удельная замедляющая сила (тормозной режим) 4ТЭ116УМ.

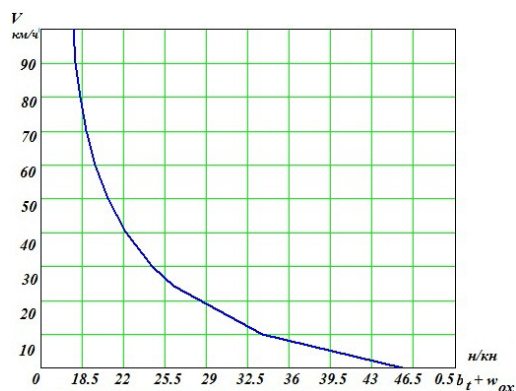


Рис. 2в. Удельная замедляющая сила (тормозной режим) 2ТЭ116УМ-23АГАЛ.

$$f(v) = b_T + w_{ox} \quad (6)$$

Расчёт зависимости удельной ускоряющей и замедляющей сил от скорости проводился на массиве дискретных значений скорости, взятых в интервале от «0» до конструкционной скорости локомотива v_k с шагом $\Delta v = 10$ км/ч. Кроме этого, расчёты производились для расчётной скорости и скорости, соответствующей точке перелома тяговой характеристики локомотива.

Результаты вычислений представлены на рис. 1(а-в) и рис. 2(а-в), где они присутствуют в виде графиков зависимости равнодействующей силы (при трех режимах движения) от скорости.

На основе полученных данных построена диаграмма удельных равнодействующих сил для различных локомотивов, после чего с ее помощью на графике продольного профиля проведён расчёт скорости

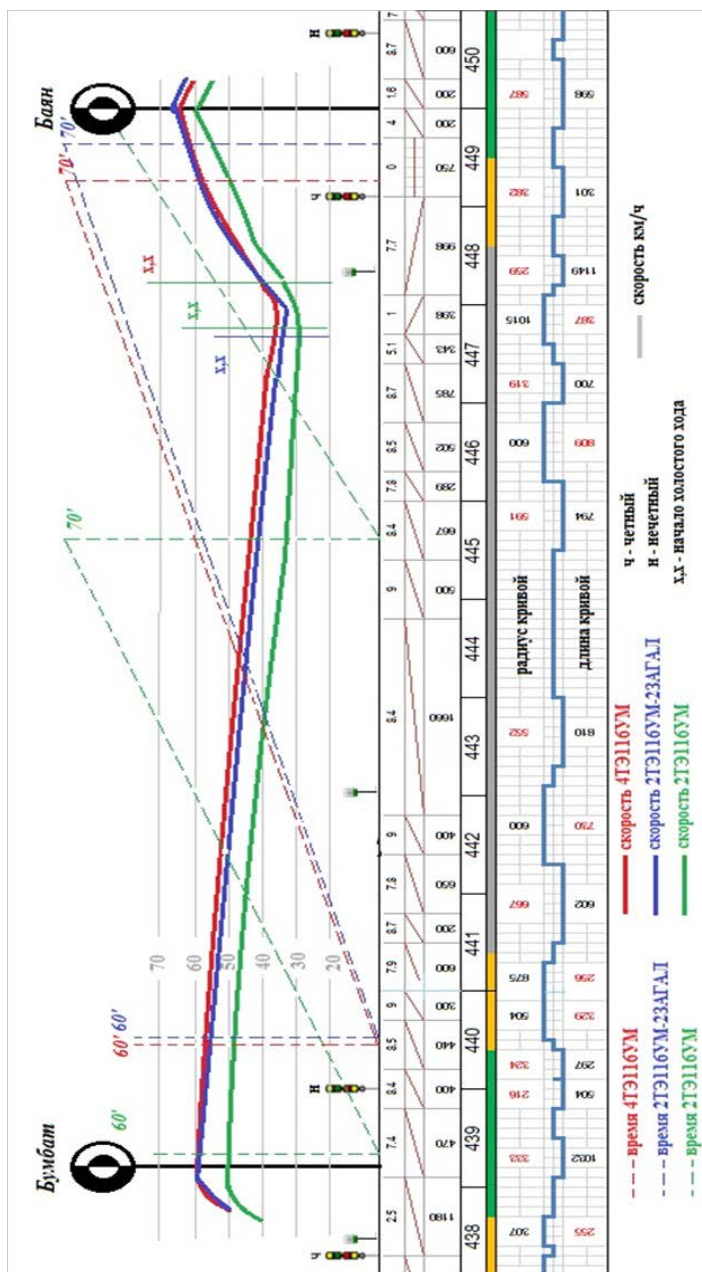


Рис. 3. Результаты расчёта кривой скорости и времени движения на участке Бумбат–Баян.

движения поезда. При расчётах использовался метод А. И. Липеца [3], наиболее удобный для применения в условиях железных дорог. Суть метода заключается в графическом интегрировании уравнения движения поезда. При построении кривой скорости по методу Липеца необходимо разрешить противоречие: с одной стороны, стремиться к развитию максимальных скоростей с тем, чтобы повысить пропускную способность железной дороги, с дру-

гой стороны, следует обеспечить экономию энергоресурсов.

Поставленная задача решается за счёт рационального использования накопленной кинетической и потенциальной энергии поезда. Результаты расчёта кривой скорости показаны на рис. 3, где фигурирует наиболее сложный перегон Бумбат–Баян.

На основе кривой скорости и при помощи графического метода Г. В. Лебедева



[3] получено полное время движения и время работы ТЭД в различных режимах на участке Толгойт–Чойр. Этот метод позволяет получить наиболее точные результаты, является наглядным и не требует значительных затрат машинного времени. Он допускает достаточно простую программную реализацию, поскольку основан на дифференциальной связи скорости и координаты: тангенс угла, образованного касательной к графику зависимости $t = f(S)$ и осью времени, пропорционален средней скорости движения на данном интервале пути. Результаты вычисления движения показаны на рис. 3.

Определив время хода поезда t по участку методом Лебедева, следует рассчитать среднюю техническую v_T и участковую $v_{уч}$ скорости движения для каждого варианта сравнения, км/ч:

$$V_T = \frac{60 \cdot \sum S}{t}; \quad (7)$$

$$V_{уч} = \beta_y \cdot V_T. \quad (8)$$

Здесь $\sum S$ — общая длина участка профиля (в километрах), t — общее время хода поезда (в минутах), β_y — коэффициент участковой скорости, который можно принять в интервале $\beta_y = 0,8–0,9$.

Анализ режимов работы ТЭД позволяет найти расход топлива на основе известных соотношений, после чего оказывается возможным сделать выводы относительно целесообразности эксплуатации локомотива. Расход дизельного топлива (в килограммах) тепловозом при движении по заданному участку определяют по формуле:

$$E = \sum_{i=1}^{n_k} G_i \cdot t_i + g_x \cdot t_x, \quad (9)$$

где G_i — расход топлива за i -ую минуту при движении тепловоза в режиме тяги при i -ом положении рукоятки контроллера машиниста (кг/мин). Данные значения приводятся в [4] в виде расходных характеристик $G = f(v, n_k)$; n_k — число используемых для ведения поезда позиций рукоятки контроллера машиниста, g_x — расход топлива за i -ую минуту при движении тепловоза в режимах холостого хода дизеля и торможения (кг/мин). Те же значения приводятся в [5], там t_i — суммарное время движения тепловоза в режиме тяги при i -ом положении рукоятки контроллера

машиниста (в минутах), оно определяется по кривой $t = f(S)$; t_x — суммарное время движения тепловоза в режимах холостого хода и торможения (в минутах), определяется по $t = f(S)$.

Более удобной величиной является удельный расход натурального дизельного топлива на единицу перевозочной работы $10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$ брутто, измеренный в единицах $\text{кг}/10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$ брутто:

$$e = \frac{Eg}{Q \sum S} \cdot 10^4. \quad (10)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Выбранная масса поезда 8000 т проверялась, исходя из максимально возможного веса поезда, который вычислялся согласно формуле (11) [6]:

$$Q_m = \frac{F_{kp} - (\omega_0 + i_p) \cdot P}{(\omega_0 + i_p)}, \quad (11)$$

с учетом F_{kp} — расчётной силы тяги локомотива и расчётной скорости v_p . Для локомотива 4ТЭ116УМ получено значение $Q_m = 9675 \text{ т}$, для комбинации локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ — $Q_m = 10245 \text{ т}$. Как видно, масса поезда 8000 т выбрана с большим запасом. Он необходим еще и потому, что следует обеспечить надёжную работу компрессора, призванного сохранить расчётное значение ускорения при торможении, а также не допустить перегрева ТЭД локомотива. Расчёт надёжности проводился по известным формулам [6].

Выбранная масса поезда также проверялась по условию трогания с места на расчётном подъёме:

$$Q_{kmp} = \frac{F_{kmp}}{(\omega_{mp} + i_{max}) \cdot g} - P \cdot g. \quad (12)$$

Здесь F_{kmp} — сила тяги локомотива при трогании с места, измеренная в H ; w_{mp} — удельное сопротивление состава при трогании с места, в $\text{кгс}/\text{т}$. Расчёт показал, что для обоих вариантов рассчитанная масса превышает выбранную: для локомотива 4ТЭ116УМ $Q_{ktr} = 10015 \text{ т}$, для комбинации локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ $Q_{ktr} = 10132 \text{ т}$.

Одним из основных критериев правильности выбора массы поезда служит также условие надёжного торможения. Расчётный коэффициент надёжности должен находиться в пределах $[0,28–0,33]$:

Таблица 2

Локомотив (вес поезда)	t, мин	v, км/ч	E, кг	e, кг/10 ⁴ т • км бр.
2ТЭ116УМ (4500 т, два поезда следуют друг за другом)	265,1 + 30	58,4	3623,5	156,5
4ТЭ116УМ (8000 т)	260,2	59,5	3421,1	162,6
2ТЭ116УМ-23АГАЛ (8000 т)	256,5	60,3	3264,7	155,1

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n K \cdot \phi_{ui}}{(P+Q) \cdot g} \quad (13)$$

Здесь K – сила нормального давления тормозных колодок, ϕ – эмпирический коэффициент, зависящий от типа вагона и количества осей. Расчётные значения оказались $g = 0,321$ (для локомотива 4ТЭ116УМ) и $g = 0,320$ (для комбинации локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ).

Параметры эффективности, найденные для двух предложенных вариантов локомотивов, сопоставлялись с данными, полученными для локомотива, который эксплуатируется на УБЖД (на участке Толгойт–Чойр): 2ТЭ116УМ-4500 т (два поезда следуют друг за другом с интервалом 30 минут).

Расчётные значения времени движения (получено графическим способом из анализа кривой скорости, в мин), технической скорости (формулы (7, 8), в км/ч), удельного расхода топлива (формулы (9, 10), в кг) представлены в таблице 2.

Как видно из представленных результатов, комбинация локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ позволяет организовать более быстрые и экономичные грузоперевозки. При этом вариант оказывается наиболее выигрышным по всем параметрам: удельному расходу топлива, средней скорости движения, времени движения и экономит трудозатраты персонала. Еще раз подчеркнём, что для сравнения предложенных в работе вариантов эксплуатации с традиционным вариантом необходимо выполнять расчёты для двух поездов 2ТЭ116УМ с грузом по 4500 т, следующих друг за другом с интервалом 20–30 минут. Такой интервал обусловлен тем, что на УБЖД используется полуавтоматическая блокировка, которая подразумевает наличие на

перегоне одного поезда, в то время как в условиях РЖД применяется автоматическая блокировка [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными приоритетами УБЖД является быстрота, надёжность, безопасность и экономическая эффективность грузоперевозок. Используемый в настоящее время локомотив 2ТЭ116УМ вполне соответствует всем предъявляемым требованиям. Тем не менее при более детальном рассмотрении возможностей железной дороги появляются варианты с поездами большей массы, которые позволяют добиться лучших, чем ранее показателей эффективности.

Использование предложенной комбинации локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ более эффективно прежде всего с точки зрения трёх показателей: времени движения, расчётной скорости и расхода топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов. – М.: Маршрут, 2005. – 448 с.
2. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Скворцова А. И. Тяговые расчёты: Справочник / Под ред. П. Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
3. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
4. Осипов С. И., Осипов С. С., Феоктистов В. П. Теория электрической тяги: Учебник для вузов. – М.: Маршрут, 2006. – 436 с.
5. Теория и конструкция локомотивов: Учебник для вузов / Под ред. Г. С. Михальченко. – М.: Маршрут, 2004. – 424 с.
6. Руднев В. С. Тяговые расчёты для магистральных железных дорог: Методические указания. – М.: МИИТ, 2002. – 44 с.
7. Основы электрической тепловозной тяги / Под ред. С. И. Осипова. – М.: Транспорт, 2000. – 408 с.
8. Кравцов Ю. А., Нестеров В. Л., Лекута Г. Ф. и др. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики / Под ред. Ю. А. Кравцова. – М.: Транспорт, 1996. – 400 с.

Координаты авторов: **Гантумур Бурэн-Итгэл** – itgel_007@mail.ru, **Пречисский В. А.** – prechis@gmail.com, **Слепцов М. А.** – sleptsovma@mpei.ru, **Барат А. А.** – Artemsputt@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 09.10.2016, принята к публикации 18.11.2016.

