

УДК 621.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-68-74

Сравнительный анализ использования различных локомотивов для грузонапряженных магистральных железных дорог Монголии

Г. Бурэн-Итгэл, В.А. Пречисский, А.А. Барат

Оптимизация грузоперевозок в условиях железной дороги Монголии подразумевает такой выбор локомотива, при котором сокращается время грузоперевозки, достигается экономия топлива и повышаются экономические показатели эксплуатации.

Двухсекционный локомотив 2ТЭ116УМ, обеспечивающий движение состава массой 4500 т, на данный момент соответствует всем требованиям, предъявляемым Улан-Баторской железной дорогой (УБЖД), однако в связи с развивающимися экономическими отношениями между Российской Федерацией и Китаем встают задачи повышения пропускной способности, что обусловило поиск других, более эффективных и одновременно максимально безопасных вариантов перевозок.

Рассмотрено три варианта эксплуатации составов массой 8000 т: с помощью четырехсекционного локомотива 4ТЭ116УМ; с локомотивом 2ТЭ116УМ, используемым совместно с локомотивом 2ЗАГАЛ и с газотурбовозом ГТh-001-DASH01.

Исследование проводили на основе построения кривой скорости методом А.И. Липеца. При расчете времени движения и времени работы тягового электродвигателя (ТЭД) в различных режимах применялся метод Г.В. Лебедева. Полученные результаты позволили вычислить удельный расход топлива и определить показатели относительной эффективности.

После анализа трех возможных вариантов грузоперевозок на участке движения Толгойт – Чойр установлено, что комбинация локомотивов 2ТЭ116УМ-2ЗАГАЛ, а также эксплуатация локомотива с газотурбинным двигателем ГТh-001-DASH01 позволят организовать более быстрые и экономичные грузоперевозки. При этом данные варианты оказываются наиболее выигрышными по стоимости топлива, средней скорости и времени движения. Учитывая оснащенность УБЖД данными локомотивами, предлагаемая идея может быть практически реализована на наиболее грузонапряженных участках.

Ключевые слова: кинетическая и потенциальная энергия поезда, эффективность эксплуатации, оптимизация грузоперевозок, локомотив.

Для цитирования: Бурэн-Итгэл Г., Пречисский В.А., Барат А.А. Сравнительный анализ использования различных локомотивов для грузонапряженных магистральных железных дорог Монголии // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 68—74. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-68-74.

Comparative Analysis of Using Different Locomotives for Heavy-Duty Main-Line Railroads of Mongolia

G. Buren-Itgel, V.A. Prechissky, A.A. Barat

The optimization of cargo traffic under the conditions of Mongolian railways implies selecting a locomotive the use of which makes it possible to minimize the cargo transportation time, to save fuel, and to improve the performance economic parameters.

A 2TE116UM two-unit locomotive able to drive a 4500-ton train is presently meeting all the requirements set forth by the Ulan-Bator Railway. However, in view of growing economic cooperation between Russia and China, increasing the railway capacity has become a topical issue, which generates the need to search for other more efficient and at the same time safest cargo transportation arrangements.

The article discusses three possible methods of handling 8000-ton trains: (1) with a 4TE116UM four-unit locomotive, (2) with a 2TE116UM locomotive used in combination with a 2ZAGAL locomotive, and (3) the same with a GTh-001-DASH01 gas-turbine driven locomotive.

The study was carried out through constructing the speed curve by using the A.I. Lipets method. The travelling time and the time of traction motor operation in different modes were calculated using the G.V. Lebedev method. The obtained results were used for calculating the fuel consumption rate and the relative efficiency parameters.

Three possible arrangements for transporting cargoes in the Tolgoit–Choir section were analyzed, and it has been found from the analysis results that more rapid and economically efficient cargo haulages can be arranged by using the combination of 2TE116UM and 2ZAGAL locomotives, or by using the GTh-001-DASH01 gas-turbine driven locomotive. These arrangements turn to be the most advantageous ones in terms of fuel cost, average speed, and travel time. In view of the fact that the Ulan-Bator Railway is currently equipped with the abovementioned locomotives, it is deemed that the proposed idea can be embodied in sections with the most heavy-duty traffic.

Key words: kinetic and potential energy, performance efficiency, optimization of cargo traffic, locomotive.

For citation: Buren-Itgel G., Prechissky V.A., Barat A.A. Comparative Analysis of Using Different Locomotives for Heavy-Duty Main-Line Railroads of Mongolia. MPEI Vestnik. 2017; 4: 68—74. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-68-74.

Введение

Планируемое к 2020 г. резкое повышение транзита товаров из России в Китай и обратно требует переоснащения Улан-Баторской железной дороги. В рамках подготовительного этапа, предшествующего резкому повышению транзита, необходимо найти оптимальные режимы грузоперевозок, подразумевающие наилучшее сочетание расхода топлива, времени грузоперевозки, массы состава и показателей экономической эффективности. В настоящей работе приведены вычисления для одного из наиболее грузонапряженных участков движения Толгойт – Чойр.

На данный момент на УБЖД стандартно эксплуатируются составы массой $m = 4500$ т с двухсекционным локомотивом 2ТЭ116УМ. Однако данная практика не является абсолютно обоснованной. Использование составов массой $m = 8000$ т с четырехсекционным локомотивом 4ТЭ116УМ, с совместно используемыми локомотивами

2ТЭ116УМ и 2ZAGAL или с газотурбовозом ГТн-001-DASH01 позволит сэкономить как общее время перевозки грузов, так и затраты на топливо при условии безопасности движения при разгоне и торможении.

Методика расчета

Вычисление показателей эффективности эксплуатации различных локомотивов основано на стандартной методике, представленной на рис. 1.

На начальном этапе нужно изучить продольный профиль исследуемого участка пути (в рассматриваемом примере: Толгойт – Чойр, данные предоставлены УБЖД). Расчетная схема профиля получается путем группировки сходных элементов и заменой кривых участков пути фиктивными подъемами. Затем, задав массу поезда, следует выбрать серию и число секций локомотива на основе вычисления минимальной силы тяги локомотива для ведения грузового поезда данного веса по расчетному подъему с расчетной постоянной скоростью [1]:

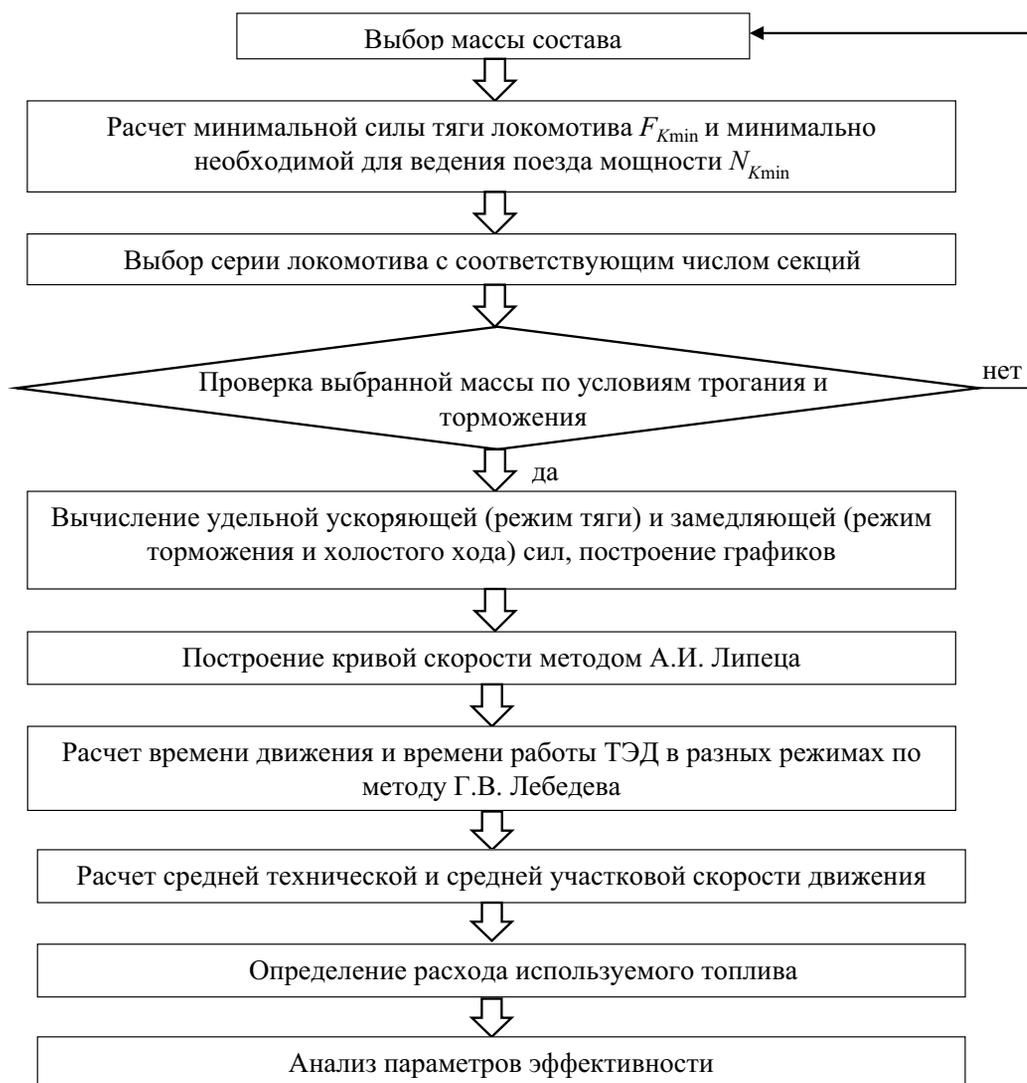


Рис. 1. Методика расчета параметров эффективности

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

Здесь Q — вес грузового состава поезда, кН; i_p — крутизна расчетного подъема; q — отношение веса состава поезда к весу локомотива.

Основное удельное сопротивление движению поезда ω_0 определяется как

$$\omega_0 = \frac{\omega'_0 + q\omega''_0}{1+q}.$$

Величины ω'_0 , ω''_0 , характеризующие основное удельное сопротивление движению локомотива и грузового состава, взяты из [2, 3] для расчетной скорости $v_p = 24$ км/ч. Минимально необходимая для ведения поезда мощность определяется по формуле [1]

$$N_{K \min} = \frac{F_{K \min} v_p}{3600}.$$

По величинам $F_{K \min}$ или $N_{K \min}$ можно выбрать серию локомотива с соответствующим числом секций и расчетными параметрами не ниже минимально необходимых. Расчетные параметры выбранных серий локомотива представлены в табл. 1.

После того как выбран тип и количество секций локомотива, следует провести тяговый расчет 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 [4].

Удельная ускоряющая сила (в режиме тяги) является функцией скорости и может быть найдена согласно выражению [2]

$$f(v) = f_k - \omega_0,$$

где $f_k = F_k / (P + Q)$ — удельная сила тяги; P , Q — масса локомотива и поезда соответственно. Удельная замедляющая сила (тормозной режим) [2]

$$f(v) = 0,5b_t + \omega_{0x},$$

где $b_t = 270 \frac{v+100}{5v+100} v_p$ — удельная тормозная сила;

$\omega_{0x} = \frac{\omega'_x P + \omega''_x Q}{P + Q}$ — удельная замедляющая сила в режиме

холостого хода.

Основное удельное сопротивление движению подвижного состава в режиме холостого хода вычисляется согласно формуле $w'_x = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2$. В режиме экстренного торможения удельную замедляющую силу можно вычислить согласно выражению [1]:

$$f(v) = b_t + \omega_{0x}.$$

Расчет зависимостей удельной ускоряющей и замедляющей сил от скорости проводился на массиве дискретных значений скорости, взятых в интервале от нуля до конструкционной скорости локомотива v_k с шагом $\Delta v = 10$ км/ч. Кроме этого, расчеты проводились для расчетной скорости и скорости, соответствующей точке перелома тяговой характеристики локомотива. В качестве примера на рис. 2 представлены графики зависимости равнодействующей силы (при трех режимах движения) от скорости локомотива ГТh-001-DASH01.

На основе полученных данных построена диаграмма удельных равнодействующих сил для различных локомотивов, после чего на графике продольного профиля проведен расчет скорости движения поезда. При расчетах использовался метод Липеца [5], наиболее удобный для применения в условиях железных дорог. Его суть заключается в графическом интегрировании уравнения движения поезда. При построении кривой скорости по методу Липеца необходимо разрешить противоречие: с одной стороны, нужно стремиться к развитию максимальных скоростей, с тем чтобы повысить пропускную способность железной дороги, с другой стороны, следует обеспечить экономию энергоресурсов.

Данная задача решается за счет рационального использования накопленной кинетической и потенциальной энергии поезда. Результаты расчета кривой скорости показаны на рис. 2, где рассмотрен один из наиболее сложных перегонов Хонхор – Бумбат.

Таблица 1

Задаваемые исходные параметры сравниваемых серий локомотивов

Основной параметр локомотива	Серия локомотива		
	4ТЭ116УМ	2ТЭ116УМ - 2ZAGAL	ГТh-001-DASH01
Эффективная мощность (мощность длительного режима), кВт	10600	10587	10943
Число секций	4	4	3
Расчетная сила тяги, Н	1460	1430	1350
Расчетная скорость, км/ч	24,4	24,4	27,8
Конструкционная скорость, км/ч	100	100	100
Расчетный вес, кН	5520	5364	4320

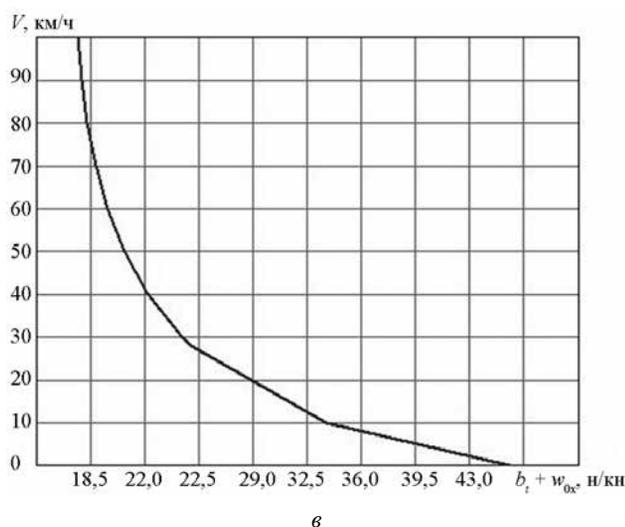
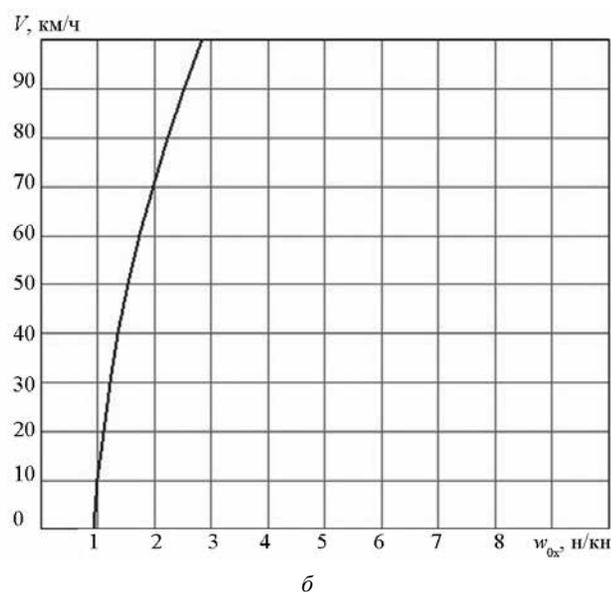
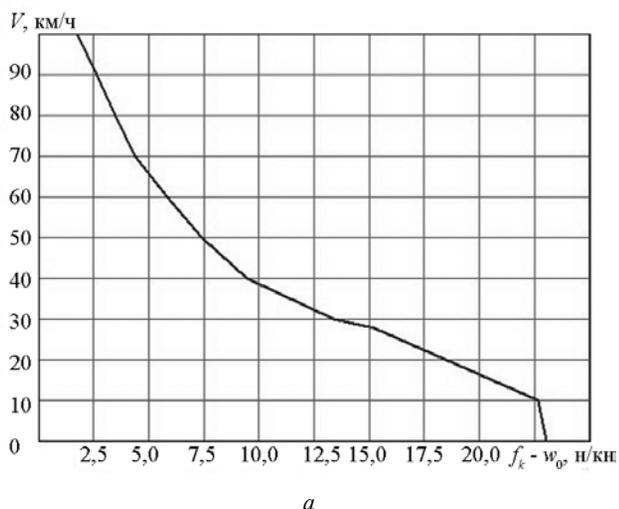


Рис. 2. Удельная замедляющая сила ГТн-001-DASH01 в режимах тяги (а), холостого хода (б) и при тормозном режиме (в)

На основе кривой скорости с помощью графического метода Лебедева [5] получено полное время движения и время работы ТЭД в различных режимах на участке Хонхор – Бумбат. Данный 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 [2], следует рассчитать среднюю техническую v_T и участковую $v_{yч}$ скорости движения для каждого варианта сравнения:

$$v_T = \frac{60 \sum S}{t};$$

$$v_{yч} = \beta_y v_T.$$

Здесь $\sum S$ — общая длина участка профиля, км; t — общее время хода поезда, мин; β_y — коэффициент участковой скорости, который можно принять в интервале $\beta_y = 0,8...0,9$.

Анализ режимов работы ТЭД [6] позволяет вычислить расход топлива на основе известных соотношений, после чего можно сделать выводы относительно целесообразности эксплуатации данного локомотива. Расход дизельного топлива тепловозом при движении по заданному участку определяют по формуле

$$E = \sum_{i=1}^{n_k} G_i t_i + g_x t_x,$$

где G_i — расход топлива за i -ю минуту при движении тепловоза в режиме тяги при i -м положении рукоятки контроллера машиниста, кг/мин (данные значения приведены в [1] 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 -ю минуту при движении тепловоза в режимах холостого хода дизеля и торможения, кг/мин (данные значения приведены в [7]); t_i — суммарное время движения тепловоза в режиме тяги при i -м положении рукоятки контроллера машиниста, определяется по кривой $t = f(S)$, мин; t_x — суммарное время движения тепловоза в режимах холостого хода и торможения, мин.

Более удобной величиной является удельный расход натурального дизельного топлива на единицу перевозочной работы 104 т-км брутто, измеренный в единицах кг/104 т-км брутто:

$$e = \frac{Eg}{Q \sum S} 10^4.$$

Отметим, что поскольку двигатель газотурбовоза ГТн-001-DASH01 работает на сжиженном природном

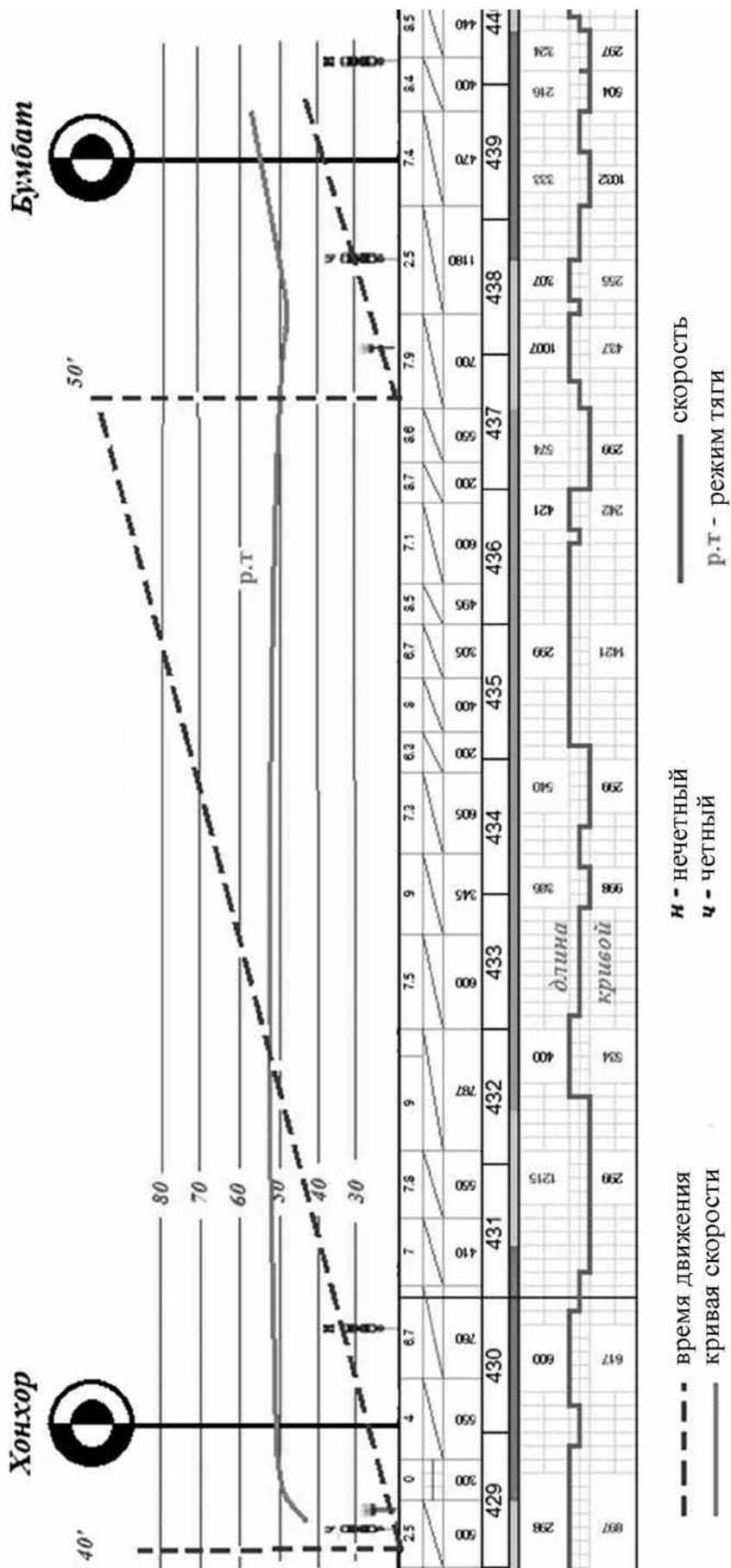


Рис. 3. Результаты расчета кривых скорости и времени движения на участке Хонхор – Бумбат для локомотива ГТн-001-DASH01

Таблица 2

Расчетные значения времени движения, технической скорости и стоимости топлива на участке Толгойт – Чойр

Локомотив (масса поезда)	t , мин	v , км/ч	E , кг	Стоимость топлива, руб.
2ТЭ116УМ (4500 т, два поезда следуют друг за другом)	265,1 + 30	58,4	3623,5	135881,25
4ТЭ116УМ (8000 т)	260,2	59,5	3421,1	128291,25
2ТЭ116УМ-23АГАЛ (8000 т)	256,5	60,3	3264,7	122426,25
ГTh-001-DASH01 (8000 т)	254,0	60,95	4478 газ/534,76	70502,65

газе, непосредственное сравнение расхода топлива неинформативно. В связи с этим эффективность использования топлива сравнивается по его стоимости.

Результаты и их анализ

Выбранная масса поезда проверялась исходя из максимально возможного веса поезда, который вычислялся согласно формуле [1]

$$Q_m = \frac{F_{кр} - (\omega'_0 + i_p)P}{(\omega''_0 + i_p)}$$

с учетом $F_{кр}$ — расчетной силы тяги локомотива (с учетом числа секций) и расчетной скорости v_p . Для всех рассмотренных локомотивов масса поезда 8000 т выбрана с большим запасом. Запас по массе необходим также потому, что необходимо организовать надежную работу компрессора, который должен обеспечить расчетное значение ускорения при торможении, а также отсутствие перегрева ТЭД локомотива. Расчет надежности проводился по формулам [1].

Выбранная масса поезда также рассчитывалась по условию трогания с места на расчетном подъеме:

$$Q_{кр} = \frac{F_{кр}}{(\omega_{тр} + i_{max})g} - Pg.$$

Здесь $F_{кр}$ — сила тяги локомотива при трогании с места, Н; $w_{тр}$ — удельное сопротивление состава при трогании с места, кгс/т. Расчет показал, что для трех рассмотренных вариантов рассчитанная масса превышает выбранную.

Одним из основных критериев правильности выбора массы поезда является также условие надежного торможения. Расчетный коэффициент надежности должен находиться в пределах 0,28...0,33:

$$\vartheta = \frac{\sum^n K\varphi_{ш}}{(P + Q)g}.$$

Здесь K — сила нормального давления тормозных колодок; φ — эмпирический коэффициент, зависящий от типа вагона и количества осей. Расчетные значения $\vartheta = 0,321$ (для локомотива 4ТЭ116УМ) и 0,320 (для комбинации локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ и ГTh-001-DASH01).

Параметры эффективности, представленные для трех предложенных вариантов локомотивов, сопоставили с данными, полученными для локомотива, эксплуати-

руемого в настоящее время на УБЖД (на участке Толгойт – Чойр) — 2ТЭ116УМ-4500 т (два поезда следуют друг за другом с интервалом 30 мин).

Расчетные значения времени движения, технической скорости, стоимости топлива на исследуемом участке представлены в табл. 2.

Как видно из представленных результатов табл. 2, комбинация локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ и локомотив с газотурбинным двигателем ГTh-001-DASH01 позволят организовать более быстрые и экономичные грузоперевозки. При этом вариант эксплуатации ГTh-001-DASH01 оказывается наиболее выигрышным по всем параметрам: стоимости топлива, средней скорости и времени движения. Еще раз подчеркнем, что для сравнения предложенных в работе вариантов эксплуатации с традиционным вариантом необходимо выполнять расчеты для двух поездов 2ТЭ116УМ-4500 т, следующих друг за другом с интервалом 20...30 мин. Данный интервал обусловлен тем, что на УБЖД используется полуавтоматическая блокировка, подразумевающая наличие на перегоне одного поезда, в то время как в условиях РЖД используется автоматическая блокировка [8].

Заключение

Основными приоритетами УБЖД является быстрота, надежность, безопасность и экономическая эффективность грузоперевозок. Используемый в настоящее время локомотив 2ТЭ116УМ-4500 т вполне соответствует всем предъявляемым требованиям, тем не менее при более детальном рассмотрении возможностей дороги два варианта использования локомотивов и поездов большей массы позволяют добиться более высоких показателей эффективности.

Таким образом, эксплуатация локомотивов 2ТЭ116УМ-23АГАЛ или ГTh-001-DASH01 является наиболее целесообразной по всем рассмотренным параметрам эффективности.

Литература

1. Руднев В.С. Тяговые расчеты для магистральных железных дорог. М.: МИИТ, 2002.
2. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги. М.: Маршрут, 2005.
3. Основы электрической тепловозной тяги / под ред. С.И. Осипова. М.: Транспорт, 2000.

4. **Гребенюк П.Т., Долганов А.Н., Скворцова А.И.** Тяговые расчеты. М.: Транспорт, 1987.

5. **Правила** тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985.

6. **Осипов С.И., Осипов С.С., Феоктистов В.П.** Теория электрической тяги. М.: Маршрут, 2006.

7. **Теория** и конструкция локомотивов / под ред. Г.С. Михальченко. М.: Маршрут, 2004.

8. **Кравцов Ю.А. и др.** Системы железнодорожной автоматики и телемеханики / под ред. Ю.А. Кравцова. М.: Транспорт, 1996.

References

1. **Rudnev V.S.** Tiagovye Raschety Dlia Magistralnykh Zheleznnykh Dorog. М.: МИИТ, 2002. (in Russian).

2. **Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel S.Ia.** Teoriia Lokomotivnoi Tiagi. М.: Marshrut, 2005. (in Russian).

3. **Osnovy** Elektricheskoi Teplovoznoi Tiagi / pod Red. S.I. Osipova. М.: Transport, 2000. (in Russian).

4. **Grebeniuk P.T., Dolganov A.N., Skvortsova A.I.** Tiagovye Raschety. М.: Transport, 1987. (in Russian).

5. **Pravila** Tiagovykh Raschetov dlia Poezdnoi Raboty. М.: Transport, 1985. (in Russian).

6. **Osipov S.I., Osipov S.S., Feoktistov V.P.** Teoriia Elektricheskoi Tiagi. М.: Marshrut, 2006. (in Russian).

7. **Teoriia i Konstruktsiia** Lokomotivov / pod Red. G.S. Mikhalchenko. М.: Marshrut, 2004. (in Russian).

8. **Kravtsov Iu.A. i dr.** Sistemy Zheleznodorozhnoi Avtomatiki i Telemekhaniki / pod Red. Iu.A. Kravtsova. М.: Transport, 1996. (in Russian).

Сведения об авторах

Бурэн-Итгэл Гантумур (Монголия) — аспирант кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ»

Пречисский Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ», e-mail: prechis@gmail.com

Барат Артем Александрович — старший преподаватель кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ»

Information about author

Buren-Itgel Gantumur (Mongolia) — Ph.D.-student of Electrical Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI

Prechissky Vladimir A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electrical Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI, e-mail: prechis@gmail.com

Barat Artem A. — Senior Lecturer of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI

Статья поступила в редакцию 04.02.2017