

УДК 629.42

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА МАНЕВРОВЫХ ЛОКОМОТИВАХ

**Завальный Ф.Г., Ильичев В.Ю., Шевелев Д.В.**

*Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Статья посвящена описанию исследований, ставящих своей целью изучение и обоснование перспективности применения газотурбинных установок (ГТУ) для привода маневровых локомотивов на железных дорогах. При этом решаются остро актуальные на данный момент проблемы повышения экологических показателей железнодорожного транспорта и замены дорогого топлива, используемого в дизельных установках, на значительно более дешёвый природный газ. Целью исследований также является разработка методики технико-экономического обоснования замены дизельного железнодорожного транспорта на газотурбинный. При этом учитываются многочисленные особенности работы маневровых локомотивов по сравнению с магистральными. Для демонстрации разработанной методики с помощью электронных таблиц Microsoft Excel произведён расчёт часовой стоимости топлива для дизельного маневрового локомотива с использованием распределения режимов его работы. Для сравнения эффективности ГТУ и дизельного двигателя была спроектирована одновальная газотурбинная установка, обеспечивающая необходимые для локомотива характеристики. Цикл ГТУ рассчитывался с помощью специально разработанной компьютерной программы. Для ГТУ также произведён расчёт часовой стоимости топлива. По результатам расчётов сделаны обоснованные выводы о целесообразности замены дизельных установок на ГТУ и предложены рекомендации для дальнейшего развития исследований по применению газотурбинных двигателей на маневровых локомотивах. Разработанную методику и результаты проведённых исследований можно использовать для изучения перспектив применения других, более сложных схем ГТУ на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** маневровый локомотив, железнодорожный транспорт, дизельный двигатель, газотурбинная установка, одновальная ГТУ, природный газ, технико-экономическое обоснование

## FEASIBILITY STUDY FOR GAS TURBINE ENGINES ON SHUNTING LOCOMOTIVES

**Zavalnyy F.G., Il'ichev V.Yu., Shevelev D.V.**

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

The article is devoted to the description of studies aimed at studying and justifying the prospects of using gas turbine plants (GTU) for driving shunting locomotives on railways. At the same time, the problems of increasing the environmental performance of railway transport and replacing expensive fuel used in diesel plants with much cheaper natural gases are being solved. The aim of the research is also to develop a method of feasibility study of replacing diesel railway transport with gas turbine transport. At the same time numerous peculiarities of operation of shunting locomotives compared to main locomotives are taken into account. In order to demonstrate the developed technique using Microsoft Excel spreadsheets, the hourly cost of fuel for a diesel shunting locomotive was calculated using the distribution of its operating modes. To compare the efficiency of the GTU and diesel engine, a single-shaft gas turbine plant was designed to provide the characteristics required for the locomotive. The GTU cycle was calculated using a specially designed computer program. For GTU, the hourly fuel cost was also calculated. Based on the results of the calculations, reasonable conclusions were drawn on the expediency of replacing diesel plants with GTU and recommendations were proposed for further development of research on the use of gas turbine engines on shunting locomotives. The developed methodology and the results of the conducted studies can be used to study the prospects of application of other, more complex GTU schemes in railway transport.

**Keywords:** shunting locomotive, railway transport, diesel engine, gas turbine plant, single-shaft GTU, natural gas, feasibility study

Железнодорожное сообщение отличается высокой пропускной способностью, надёжностью и безопасностью и поэтому является одним из наиболее распространённых видов транспорта в России.

На промежуточных пунктах следования составов – железнодорожных станциях, перегонах производится неотъемлемая часть процесса транспортировки – маневровые работы, при которых осуществляется перемещение на небольшие расстояния. Маневровые работы производятся маневровыми (тяговыми) локомотивами, которые значительно отличаются от магистральных.

Основная часть современных тяговых локомотивов – тепловозы с дизельными двигателями. Магистральные локомотивы используются для маневровых работ только в случае крайней необходимости, так как в таком режиме эксплуатации значительно снижается эффективность их работы.

Особенностями тяговых работ являются чередование страгиваний и торможений, частое изменение траектории движения состава. Поэтому основными требованиями к маневровым локомотивам являются высокие развиваемые тяговые усилия и значительный сцепной вес для обеспечения плав-

ности страгивания и снижения нагрузок на вагоны. Самая большая мощность необходима маневрово-вывозным локомотивам, которые выполняют передачу составов на другие транспортные узлы [1].

При использовании дизельных локомотивов для маневровой работы существует ряд проблем [2; 3]:

- быстрый разряд аккумуляторов;
- при быстром переключении дизеля из режима холостого хода на тягу он работает нестабильно;
- длительный период работы на режимах, далёких от номинального – на холостом ходу и в форсированном режиме, из-за чего топливо сгорает не полностью, что снижает экономичность и повышает концентрацию вредных выбросов в продуктах сгорания;
- частые разгоны и торможения, короткие пробеги с длинными простоями между ними (при этом двигатель не выключается в течение всей смены из-за сложности запуска, особенно в зимних условиях).

Перечисленные недостатки дизельных локомотивов приводят к перерасходу топлива, завышенным выбросам вредных продуктов сгорания и к высокому уровню шума [4]. По этим критериям дизельный двигатель уступает газотурбинным установкам, которые отличаются следующими достоинствами [5]:

- на порядок более низкий удельный вес;
- возможность использования более дешёвого топлива – природного газа;
- выбросы вредных веществ ГТУ на природном газе в десятки раз ниже;
- малая трудоёмкость обслуживания;
- отсутствие множества вспомогательных систем, присущих дизелям.

Учитывая тот факт, что маневровые локомотивы всё чаще применяются вблизи жилой застройки, экологические показатели начинают играть большую роль, не менее важную, чем показатели экономические [6].

Так как экологичность ГТУ не вызывает сомнений, то целью данной работы является сравнительный технико-экономический анализ дизельных и газотурбинных силовых установок маневровых локомотивов.

### Материалы и методы исследования

Для расчёта и сравнения показателей дизельных и газотурбинных силовых установок маневровых тепловозов вначале не-

обходимо произвести анализ основных режимов их работы, так как от них зависит расход и стоимость топлива.

Особенностями расходования топлива при маневровой работе являются: длительное простаивание тепловозов, частая смена позиций контроллера машиниста (ПКМ), работа на низких позициях контроллера при режимах, далёких от оптимальных.

Маневрово-вывозные тепловозы должны обладать высокой мощностью для передвижения составов на другие станции и узлы, обеспечивать плавное торможение, быстрое реверсирование, высокую надёжность и экономичность. Выбор модели тепловоза осуществляется в результате детального анализа необходимых режимов работы и условий эксплуатации.

Для сравнительного анализа экономической эффективности дизельного и газотурбинного маневрового локомотива необходимо задаться стоимостью дизельного топлива и природного газа, которая равна соответственно 53 р./кг и 26 р./кг [7].

Расчёт расхода топлива производился с использованием электронных таблиц Microsoft Excel [8] по методике, представленной в [9].

Величина расхода топлива, кг, определялась по формуле

$$E = g_k T_1 + g_x T_2,$$

где  $g_k$  и  $g_x$  – расход топлива при работе под нагрузкой и на холостом ходу, кг/с;  $T_1$  и  $T_2$  – время работы под нагрузкой и на холостом ходу, с.

При этом необходимо учитывать, что на разных режимах работы расход топлива будет отличаться, поэтому необходимо суммировать произведение расхода топлива на время работы для каждого режима.

В табл. 1 приведены значения часового расхода топлива  $g_k$  для локомотива ЧМЭЗ [9] в зависимости от позиции контроллера машиниста (ПКМ). Расход топлива в режимах выбега и торможения представляет собой постоянную величину, равную 0,15 кг/мин (9 кг/час).

В табл. 2 приведены результаты расчёта расхода топлива и стоимости эксплуатации дизельного локомотива за час с учётом процентной продолжительности каждого режима работы.

Таблица 1

Часовой расход топлива ЧМЭЗ

Показатель	Показатель контроллера машиниста (ПКМ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Расход топлива $g_k$ , кг/ч	31	63	96	110	120	160	174	180

Таблица 2

Результаты расчета стоимости эксплуатации дизельного локомотива

	0 (х.х.)	1	2	3	4	5	6	7
Время, %	30,4 (39,8)	10,9	4,7	3,9	4,2	3,7	1,6	0,6
Расход, кг		3,38	2,96	3,74	4,62	4,44	2,56	1,04

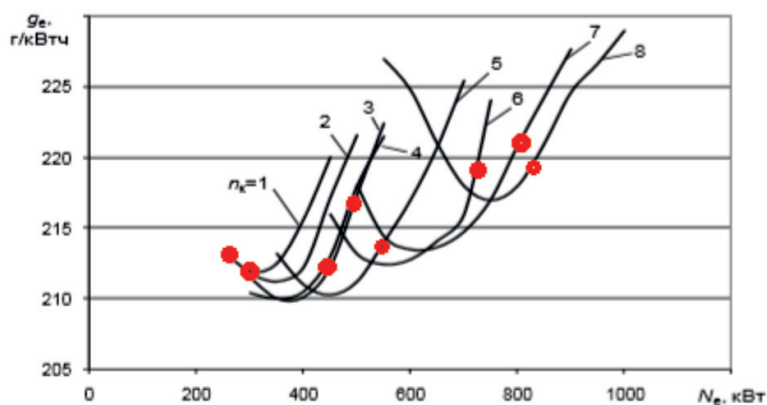


Рис. 1. Нагрузочная характеристика маневрового локомотива ЧМЭЗ

Для сравнения с дизельным двигателем была выбрана одновальная газотурбинная установка такой же мощности, что и дизельный двигатель локомотива ЧМЭЗ, оптимизированная с точки зрения КПД. Газотурбинная установка имеет центробежный двухкаскадных компрессор с номинальной степенью сжатия 10. Расчёт параметров цикла ГТУ произведен с помощью специально разработанной компьютерной программы.

Для анализа газотурбинной установки использована нагрузочная характеристика, приведённая на рис. 1 [9].

#### Результаты исследования и их обсуждение

По нагрузочной характеристике была определена мощность двигателя локомотива ЧМЭЗ на каждом ПКМ. Результаты определения эквивалентной мощности сведены в табл. 3 и отмечены на рис. 1 жирными точками.

Далее был найден необходимый для вышеуказанного распределения использования мощности часовой расход топлива (табл. 4).

Сравнительная гистограмма стоимости топлива для дизельного двигателя и газотурбинной установки для каждого положения контроллера машиниста представлена на рисунке 2. Стоимость дизельного топлива обозначена чёрным цветом, а стоимость природного газа для ГТУ — синим. Ширина каждого столбца гистограммы пропорцио-

нальна времени работы локомотива на каждом ПКМ.

Далее было произведено суммирование часовой стоимости топлива по всем ПКМ с учётом процентной продолжительности каждого режима работы.

Анализ экономической эффективности показал, что расход топлива у газотурбинного двигателя больше, чем у дизельного (54,75/26,1 кг/ч), однако, из-за более низкой стоимости топлива — природного газа, расходы на топливо для газотурбинной установки всего на 3,9% выше, чем у дизельного двигателя (1423 р./1369 р.).

При расчете эффективности установки была использована одновальная модель ГТД. Для дальнейшего развития темы исследования использования ГТД на маневровых локомотивах целесообразно рассмотреть более совершенные конструкции, с двух- и трехвальной компоновкой, имеющие более высокие показатели экономической эффективности [10]. ГТД со свободной силовой турбиной, кроме высокой экономичности, также имеют преимущества в виде высокого крутящего момента при переходных режимах.

Возможно также рассмотрение применения регенератора тепла уходящих газов для повышения КПД установки в маневровых локомотивах, однако при этом следует иметь в виду, что в локомотивах имеются жёсткие ограничения по габаритам установки.

Таблица 3

Эквивалентная мощность относительно ПКМ

ПКМ	1	2	3	4	5	6	7	8
Мощность, кВт	225	300	450	500	550	725	800	825

Таблица 4

Результаты расчета стоимости топлива для ГТД

ПКМ	0 (х.х.)	1	2	3	4	5	6	7	8
Время, %	30,4 (39,8)	10,9	4,7	3,9	4,2	3,7	1,6	0,6	0,2
Удельный расход, кг/ч		95,76	144,0	223,2	266,4	302,4	403,2	457,2	475,2
Расход за час работы ГТД, кг		10,44	6,77	8,7	11,19	11,2	6,45	0,6	0,2
Итого, кг		54,75							
Цена, р./кг		26							
Стоимость, р.		1423							



Рис. 2. Гистограмма стоимости 1 часа работы локомотива для каждого положения контроллера машиниста

### Заключение

В рамках описанной работы выполнен анализ достоинств и недостатков использования дизельных маневровых локомотивов, выявлены проблемы, связанные с эксплуатацией дизельных установок: их низкая удельная мощность, высокая концентрация вредных выбросов в продуктах сгорания, шумовое загрязнение.

С учётом проведённого анализа можно сделать вывод, что ГТД имеют ряд эксплуатационных преимуществ, к которым относятся быстрый запуск, низкая трудоемкость обслуживания, малые выбросы загрязняющих веществ и др.

Рассмотрены экономические перспективы замены дизельных установок на газотурбинные, для чего разработана методика технико-экономического обоснования и с помощью электронных таблиц Microsoft Excel произведён сравнительный анализ экономической эффективности работы дизельного двигателя и ГТД, специально спроектированного для использования на локомотиве ЧМЭЗ. В методике учтена структура процентной продолжительности работы локомотива при каждом положении контроллера машиниста.

В результате исследования установлено, что применение газотурбинных устано-

вок на маневровых локомотивах оправдано не только с эксплуатационной, но и с экономической точки зрения, особенно если применить более сложные и эффективные ГТД, чем рассмотренная в данной работе. Однако, к сожалению, сложившаяся ситуация на рынке транспорта несколько снижает динамику введения рассмотренных инноваций [11].

#### Список литературы

1. Тепловозы промышленного транспорта. Основные технические характеристики тепловозов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.matrixplus.ru/index3-001.htm> (дата обращения: 13.02.2020).
2. Тяговая характеристика и основные технические данные 2ТЭ10М. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.dieselloc.ru/2te10m\\_3te10m/2\\_3te10m\\_2.html](https://www.dieselloc.ru/2te10m_3te10m/2_3te10m_2.html) (дата обращения: 13.02.2020).
3. Силовой модуль на базе ГТД-1250 для газотурбовозов. [Электронный ресурс]. URL: <http://kadvi.ru/modul-dlya-gazoturbvozov/> (дата обращения: 13.02.2020).
4. Кузнецова И.А. Об оценке технико-энергетической эффективности работы маневровых тепловозов путем моделирования рабочих процессов оборудования в режимах эксплуатации // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2016. № 3 (8). С. 6–8.
5. Павлов Ю.Н., Бобров А.Н. Применение газотурбинных установок для объектов транспортной инфраструктуры // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2019. № 15. С. 27–33.
6. Коссов Е.Е., Кузнецова И.А. К оценке эффективности работы маневрового локомотива путём моделирования режимов работы // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 4 (46). С. 40–49.
7. Стоимость дизельного топлива и природного газа. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.benzin-price.ru/stat\\_60days.php?region\\_id=77](https://www.benzin-price.ru/stat_60days.php?region_id=77) (дата обращения: 13.02.2020).
8. Аникин В.И., Аникина О.В. Моделирование и визуализация информационной структуры алгоритмов в Microsoft Excel // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 1 (4). С. 21–28.
9. Демченко Е.Б. Оценка расхода топлива маневровыми тепловозами при расформировании составов на сортировочных горках // Транспортные системы и технологии перевозок. 2013. № 6. С. 39–46.
10. Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Ельшин А.А. Анализ параметров одновальных, двухвальных и трехвальных газотурбинных установок при частичных нагрузках // Промышленная энергетика. 2013. № 9. С. 34–36.
11. Щуров Н.И., Гурова Е.Г., Макаров С.В., Стрельникова Д.М. Анализ режимов работы силовых установок маневровых тепловозов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13504> (дата обращения: 13.02.2020).