



К вопросу эффективности работы маневровых тепловозов на грузовых терминалах

**Николай ЛЫСЕНКО****Ирина КУЗНЕЦОВА****Константин КУЗНЕЦОВ**

Лысенко Николай Евгеньевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Кузнецова Ирина Алексеевна – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Кузнецов Константин Сергеевич – Московская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», Москва, Россия.*

Основными маневровыми операциями на грузовом терминале являются подача вагонов под погрузку и их уборка после выгрузки. В статье описаны режимы работы маневрового тепловоза, выполняющего эти операции. Приведены порядок расчёта в виде алгоритма определения показателей работы маневрового тепловоза, а также результаты расчётов выполнения технологической операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки тепловозом ЧМЭЗ на грузовом терминале. Определена необходимость повышения требований к качеству принимаемых управленческих решений машинистами маневровых тепловозов. Скорректирован критерий оценки использования того или иного режима управления тепловозом.

Данные исследования направлены на обеспечение управления наиболее эффективным способом, обеспечивающим сокращение расхода топлива маневровыми тепловозами и снижение тем самым себестоимости маневровой работы на грузовом терминале, затрат владельцев грузовых терминалов.

Также выполнен и представлен сравнительный анализ применения различных вариантов управления тепловозом для наиболее распространённой операции, подачи пяти вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки, на грузовом терминале при заданных условиях эксплуатации. Определена стоимость экономленного топлива от использования рационального режима управления маневровым тепловозом.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, режимы работы тепловоза, моделирование, маневровая работа на грузовом терминале, снижение себестоимости.

*Информация об авторах:

Лысенко Николай Евгеньевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой логистических транспортных систем и технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, laborant_ltst@miit.ru, +7 (495) 684-23-64.

Кузнецова Ирина Алексеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры логистических транспортных систем и технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, irina-k3@yandex.ru.

Кузнецов Константин Сергеевич – кандидат экономических наук, ведущий экономист административно-хозяйственного центра Московской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», Москва, Россия, kst.07@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.04.2019, актуализирована 26.06.2019, 28.02.2020, принята к публикации 02.03.2020.

For the English text of the article please see p. 177.

В рамках стратегии цифровой трансформации ОАО «Российские железные дороги» актуальны повышение эффективности производственных процессов, использование расширенного набора инструментов поддержки принятия решений с экономической оценкой эффективности, широкое применение систем поддержки принятия решений, в частности программных продуктов управления маневровыми тепловозами с целью экономии топлива и снижения себестоимости маневровой работы. Крупные грузовые терминалы осуществляют выполнение услуг в комплексе: маневровые операции, погрузку, выгрузку, размещение и крепление грузов, хранение, взвешивание, складскую обработку, автодоставку [1]. Порядок выполнения операций подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки регламентируется договором. На путях необщего пользования с небольшим вагонооборотом эти маневровые операции, как правило, осуществляются по уведомлениям [2]. Подача вагонов под погрузку и их уборка после выгрузки осуществляется при помощи маневровых тепловозов.

Режим работы маневровых тепловозов [3, с. 73] состоит из сочетания простых операций, каждая из которых представляет собой сочетание одинаковых по форме единичных режимов, представленных на рис. 1 (разгон R_{pj} , поддержание постоянной скорости R_{dj} , выбег R_{uj} , торможение R_{tj} , стоянка или маневрирование одиночным локомотивом R_{xj}), отличающихся началь-

ными и конечными величинами, которые заданы в виде распределения дискретных случайных величин [4]. Моделирование маневровой работы тепловоза на грузовом терминале с использованием программного продукта выполнено по разработанной методике [4], в которой имитированы процессы движения, процессы тяги и реальные процессы в силовых установках с выбранной степенью точности для каждого из выше описанных единичных режимов. Это позволяет выполнить моделирование работы маневрового тепловоза без пересчёта повторяющихся простых операций.

Показатели любого единичного режима могут быть определены тяговым расчётом [5, с. 28] на установившихся и переходных режимах с интервалом времени Δt :

$$dv/dt = \xi(F_k \pm w_k - b_v), \quad (1)$$

где F_k – касательная сила тяги тепловоза, Н;

w_k – общее удельное сопротивление, Н/кг;

b_v – тормозная сила, Н.

Время работы на позиции контроллера складывается из коротких режимов работы, в которых статических режимов практически не бывает. На каждой позиции тепловоз работает секунды, всё остальное время работы занимают переходные процессы.

Для каждого единичного режима работы тепловоза разработаны алгоритмы (рис. 2), которые включают блоки расчётов [6]:

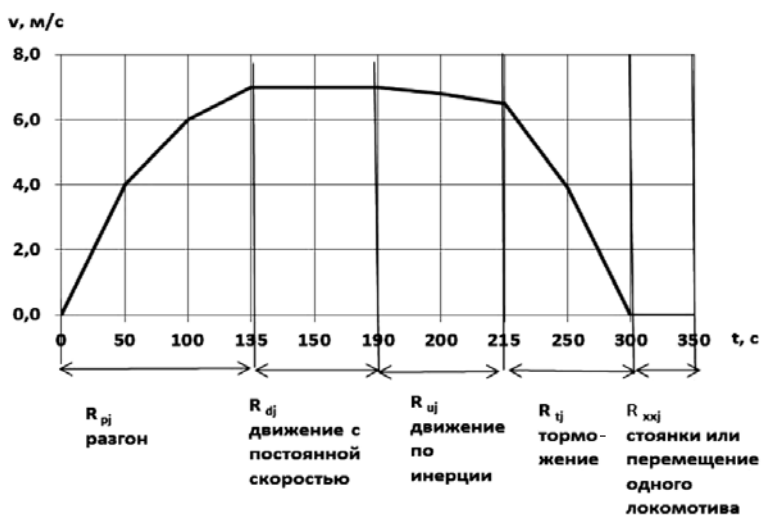


Рис. 1. Единичные режимы.



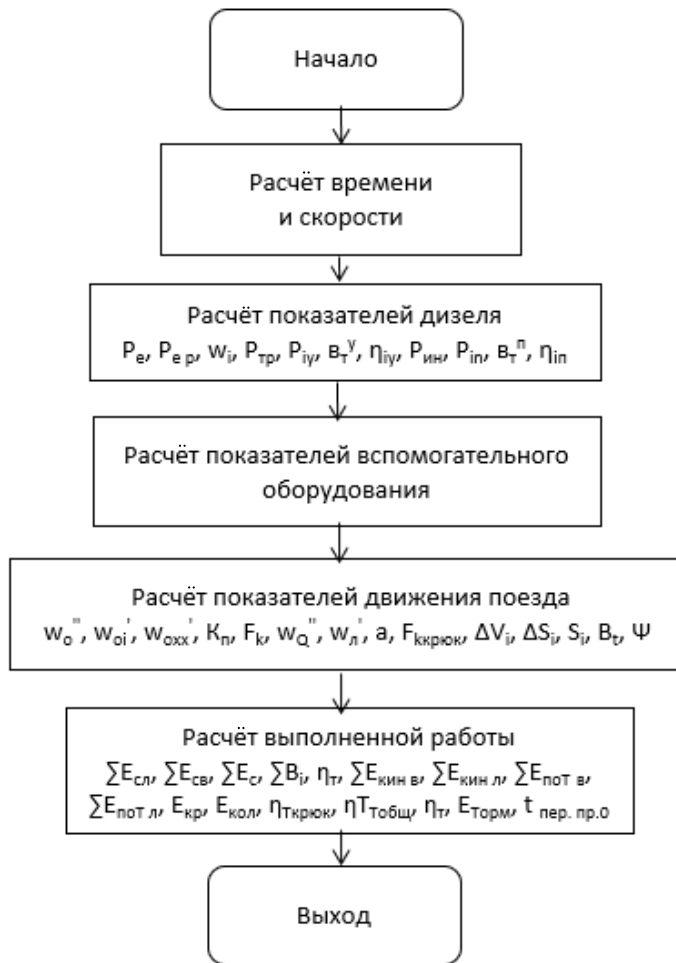


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчёта единичного режима.

• параметров движения состава с использованием положений ПТР и ограничений по сцеплению $v, F_k, dv/dt, dF_k/dt$;

• показателей работы силовой установки $P_i, P_{тр}, e_t, K_{п}$ [7];

• работы вспомогательных агрегатов $P_{всп}$;

• показателей выполненной работы и эффективности $\eta_{кр}, \eta_t, W_{л}, П$ [4],

где v – скорость, с;

dv/dt – ускорение состава, м/с;

dF_k/dt – угловая скорость, рад/с;

P_i – индикаторная мощность, Вт;

$P_{тр}$ – мощность механических потерь, Вт;

v_t – расход топлива, кг;

$K_{п}$ – показатель потерь, м/с;

$P_{всп}$ – мощность вспомогательных агрегатов, Вт;

$\eta_{кр}$ – КПД тепловоза на автосцепке;

η_t – КПД тепловоза общий;

$W_{л}$ – комплексный критерий (формула (2));

$П$ – производительность, ваг/час.

На рис. 2 приняты обозначения:

P_e – эффективная мощность дизеля на установившихся режимах, Вт;

P_{ep} – расчётная эффективная мощность дизеля, Вт;

w_i – текущее значение частоты вращения коленчатого вала, рад/с;

$P_{тр}$ – мощность механических потерь, Вт;

P_{iy} – индикаторная мощность установившегося режима, Вт;

B_T^y – расход топлива установившегося режима, кг;

η_{iy} – индикаторный КПД установившегося режима;

$P_{ин}$ – мощность сил инерции, Вт;

P_{in} – индикаторная мощность в переходном процессе, Вт;
 V_T^n – расход топлива в переходном процессе, кг;
 η_{in} – индикаторное КПД в переходном процессе;
 ω_o'' – удельное сопротивление движению вагонов, Н/кг;
 ω_{oi}' – удельное сопротивление движению тепловоза, Н/кг;
 $\omega_{охх}'$ – удельное сопротивление движению холостого хода, Н/кг;
 $K_{п}$ – показатель потерь, м/с;
 F_{ki} – касательная сила тяги тепловоза, Н;
 w_Q'' – сопротивление движению вагонов, Н;
 w_l' – сопротивление движению тепловоза, Н;
 a – ускорение состава, м/с;
 $F_{ккрюк}$ – касательная сила тяги тепловоза на автосцепке, Н;
 Δv_i – приращение скорости, м/с;
 ΔS_i – приращение пути, м;
 S_i – пройденный путь, м;
 V_t – тормозная сила, Н;
 Ψ – коэффициент сцепления;
 $\sum E_{сл}$ – диссипативная работа тепловоза, Дж;
 $\sum E_{св}$ – диссипативная работа вагонов, Дж;
 $\sum E_c$ – общая диссипативная работа, Дж;
 $\sum B_i$ – расход топлива дизелем при переходном и установившемся режимах, кг;
 η_T – КПД дизеля;
 $\sum E_{кин в}$ – кинетическая работа вагонов, Дж;
 $\sum E_{кин л}$ – кинетическая работа тепловоза, Дж;
 $\sum E_{пот в}$ – потенциальная работа вагонов, Дж;
 $\sum E_{пот л}$ – потенциальная работа тепловоза, Дж;
 $E_{кр}$ – работа на автосцепке, Дж;
 $E_{кол}$ – работа на колесе, Дж;
 $\eta_{Ткрюк}$ – КПД тепловоза на автосцепке;
 $\eta_{Тобщ}$ – КПД тепловоза общий;
 $E_{Торм}$ – работа торможения, Дж;
 $t_{пер. пр.0}$ – время переходного процесса, с.

Выполнив расчёт единичного режима работы тепловоза по вышеприведённому алгоритму, получаем результаты, представленные в виде автоматически составленной

сводной таблицы эксплуатационных показателей работы тепловоза при выполнении единичного режима и таблицы распределения расхода топлива и времени работы тепловоза по позициям контроллера машиниста [4].

Для типичной маневровой операции, используя набор основных характерных единичных режимов маневрового тепловоза и варьирование компонентов, получаем конечные результаты в виде сводной таблицы выполнения маневровой операции по выбранным единичным режимам с учётом работы на холостом ходу при стоянках [4]. Сводная таблица включает в себя: название тепловоза, массу вагонов в составе, время, путь, расход топлива, диссипативную работу вагонов и тепловоза, кинетическую работу вагонов и тепловоза, работу торможения, потенциальную работу вагонов и тепловоза, работу на автосцепке, на колесе, КПД тепловоза на автосцепке и общий, производительность тепловоза, также формируются графики расхода топлива ($B_T, B_{T уср}$) и времени ($T, T_{пер}$) по позициям контроллера машиниста за операцию [4].

Используя конечные результаты расчётов, то есть показатели выполненной работы тепловозами, можно выполнить анализ и решить множество задач, направленных на выбор тепловоза наиболее подходящего для заданных условий эксплуатации на грузовом терминале и режима управления им, применив комплексный критерий:

$$W_l = (B \cdot T) / m \rightarrow \min, \text{ при } E_{кр} = \text{const}, \quad (2)$$

где $E_{кр}$ – работа, выполняемая тепловозами на автосцепке, Дж;

B – расход топлива, кг;

T – время, с;

m – количество вагонов в составе.

Например, наиболее распространённая для грузовых терминалов, технологическая операция подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки может быть выполнена разными способами: с режимом разгон до заданной скорости при максимальном быстродействии или до заданной скорости на заданной позиции контроллера машиниста (например, 5 ПК).

Машинистам зачастую приходится управлять маневровым тепловозом [8, с. 68] в условиях эмоционального напряжения



Сравнение результатов выполнения технологической операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки тепловозом ЧМЭЗ при разных вариантах набора позиций контроллера машиниста*

Количество вагонов	Показатели работы при применении режима «разгон до заданной скорости при максимальном быстродействии» (Режим 1 (R1))			Показатели работы при применении режима «разгон до заданной скорости на заданной позиции (5)» (Режим 2 (R2))		
	Время, с, T	Расход топлива, кг, В	Комплексный критерий, W _д	Время, с, T2	Расход топлива, кг, В2	Комплексный критерий W _{д2}
5	363,2	4,5	323,2	397,8	3,57	286,4
10	381,2	5,4	205,8	421,2	4,6	193,8
15	387,1	6,7	172,9	425,1	5,9	167,2
20	404,3	7,7	155,7	445,2	6,9	153,6
25	421,2	8,9	149,9	463,7	8,1	150,2
30	433,1	10,0	144,4	482,5	9,2	148,0
35	450,3	11,1	142,8	499,3	10,3	146,9

Примечание: * расчёт выполнен при одинаковых заданных условиях, длина пройденного пути составляет 3000 м.

и стрессовых ситуаций по причине воздействия неблагоприятных факторов и различного рода помех, избыточности или дефицита информации, ограниченности по времени, возложенной высокой ответственности за обеспечение безопасности и за конечный результат, что может привести к ошибочным действиям и отражается увеличением расхода топлива. Поэтому, помимо систем мониторинга и контроля тепловоза [9], повышение требований к качеству принимаемых управленческих решений, в том числе машинистами, необходимость обработки больших объёмов информации и рационализации процессов предопределяют внедрение на маневровом тепловозе автопилотов [напр., 10], автоматизированных систем управления им, в частности блока выбора режима управления, обеспечивающего снижение расхода топлива за счёт использования наиболее рационального варианта управления режимами работы и тем самым – обеспечивая снижение себестоимости манёвров и расходов владельцев грузовых терминалов (инструментарий достижения данной цели описан в [4]).

Выберем рациональный режим управления маневровым тепловозом для конкретных условий.

В табл. 1 приведены результаты расчёта по вышеописанному алгоритму выполнения тепловозом ЧМЭЗ [11] оборудованного ЭСУВТ (электронной системой впрыска

топлива) операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки при управлении различными способами.

Как видно из табл. 1, для заданных условий при количестве вагонов в составе менее 25 наиболее предпочтителен второй вариант выполнения технологической операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки с режимом «разгон до заданной скорости на заданной позиции (5)». Значение экономии топлива [11] за наиболее распространённую технологическую операцию подачи пяти вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки, рассчитанное по данным табл. 1, определим по формуле:

$$\Delta V_p = V_{R1} - V_{R2} \quad (3)$$

где V_{R1} и V_{R2} – расход топлива тепловозом при первом и втором способе выполнения технологической операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки тепловозом ЧМЭЗ соответственно, кг.

$$\Delta V_p = 4,5 - 3,57 = 0,93 \text{ кг.}$$

Стоимость сэкономленного топлива составит [4]:

$$C = \Pi_{л} \cdot \Delta V_p \quad (4)$$

где $\Pi_{л}$ – цена 1 кг топлива, 49 руб.

$C = 49 \cdot 0,93 = 45,6$ руб. за одну операцию подачи пяти вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки.

В целом за год стоимость сэкономленного топлива за одну операцию подачи пяти вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки составит [4]:

$$C_{\text{общ. т}} = (365 - T_p) \cdot C \cdot k \quad (5)$$

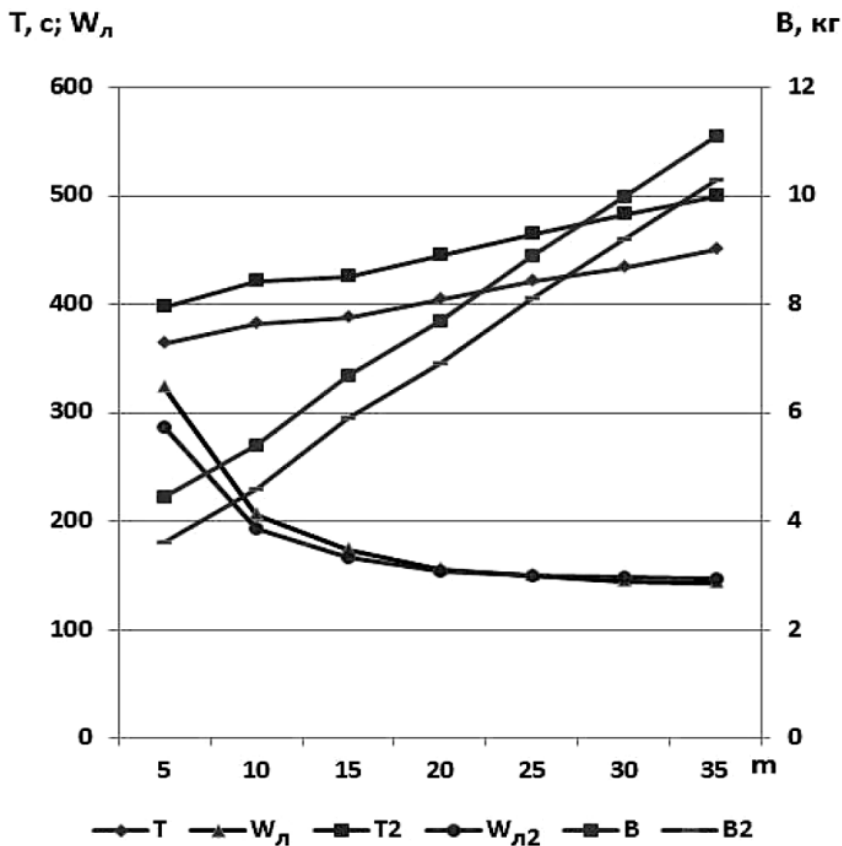


Рис. 3. Графическое изображение изменения показателей работы тепловоза и комплексного критерия $W_{л}$ при выполнении технологической операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки.

Таблица 2

Сравнение результатов выполнения технологической операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки тепловозом ЧМЭЗ при разных вариантах набора позиций контроллера машиниста (пять вагонов)

Длина маршрута	Показатели работы при применении режима «разгон до заданной скорости при максимальном быстродействии» (Режим 1 (R1))			Показатели работы при применении режима «разгон до заданной скорости на заданной позиции (5)» (Режим 2 (R2))			$\Delta W_{л}$
	Время, с, T	Расход топлива, кг, B	Комплексный критерий, $W_{л}$	Время, с, T2	Расход топлива, кг, B2	Комплексный критерий, $W_{л2}$	
1520	299	3,39	202,72	266	2,39	127,15	75,57
3200	507,6	4,2	426,38	513,6	3,8	390,34	36,04

где k – количество тепловозов (1 ед.) на грузовом терминале;

T_p – простой тепловоза при техническом обслуживании и ремонтах за год, принято $T_p = 15$ суток.

$C_{\text{общ. т}} = (365 - 15) \cdot 45,6 \cdot 1 = 15960$ руб. в год за одну операцию подачи пяти вагонов

под погрузку и их уборки после выгрузки на одном грузовом терминале.

Учитывая количество грузовых терминалов и количество маневровых операций в целом по стране, используя рациональный режим управления маневровым тепловозом, заложенный в блоке выбора режима управле-



ния, можно получить значительный экономический эффект и снижение себестоимости маневровой работы на грузовых терминалах.

На рис. 3 показана критическая точка, параметры которой подтверждают, что при количестве вагонов в составе более 25 целесообразно применять первый вариант выполнения технологической операции подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки с режимом «разгон до заданной скорости при максимальном быстродействии».

Также можно отметить, что экономия топлива от выбора рационального режима управления маневровым тепловозом более очевидна при выполнении маневровой работы короткими маршрутами.

В результате исследований сформулирована стратегия поиска рационального типа тепловоза для конкретной работы и выбора режима управления им в зависимости от объекта исследования и условий эксплуатации, в частности для грузовых терминалов. В каждом конкретном случае можно выбрать рациональный, наиболее экономичный, вариант, учитывая многообразие эксплуатируемых моделей локомотивов [напр., 12].

Специалисты научно-исследовательских организаций, изготовители и собственники маневровых тепловозов, грузовых терминалов должны стремиться к внедрению интеллектуальных систем управления техническими средствами, участвующими в процессах перевозок, в том числе и для маневровой работы, к рационализации эксплуатационной работы, гибкому внедрению новых технологий и подходов в условиях цифровой экономики.

ВЫВОДЫ

1. Имитация процессов выполнения маневровых операций на грузовом терминале позволяет с высокой достоверностью выполнить расчёт показателей работы маневрового тепловоза, уточнить расход топлива [4] и выявить наиболее рациональные режимы управления тепловозом по комплексному критерию $W_{\text{л}}$.

2. Выполнен расчёт показателей маневровой работы подачи вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки на грузовом терминале тепловозом ЧМЭЗ для заданных условий, графически показано влияние

режимов работы маневрового тепловоза на его топливную экономичность.

3. Проведён сравнительный анализ использования различных режимов управления маневровым тепловозом и определена стоимость сэкономленного топлива для наиболее распространённой технологической операции подачи пяти вагонов под погрузку и их уборки после выгрузки на грузовом терминале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Московская дирекция по управлению терминально-складским комплексом // Преимущества дирекции. [Электронный ресурс]: http://www.rzd.ru/ent/public/ru?STRUCTURE_ID=5185&layer_id=5554&id=4323. Доступ 17.04.2019.
2. ЕТП работы станции Алматы-1 и путей необщего пользования // Организация подачи и уборки вагонов. [Электронный ресурс]: https://studwood.ru/1708831/tehnika/organizatsiya_podachi_uborki_vagonov. Доступ 17.04.2019.
3. Носков В. О., Милютина Л. В., Синёв И. С., Тарута В. Ф., Чубаров И. А., Чулков А. В. Исследование условий и режимов работы маневровых тепловозов // Молодой учёный. — 2017. — № 12. — С. 72–75. [Электронный ресурс]: <https://moluch.ru/archive/146/41016>. Доступ 12.05.2019.
4. Кузнецова И. А. Оценка технико-энергетической эффективности работы маневровых тепловозов путем моделирования рабочих процессов оборудования в режимах эксплуатации. [Электронный ресурс]: <https://www.vniizht.ru/fileadmin/site/files/Kuznecova/disser.pdf>. Доступ 17.04.2019.
5. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Некрасов О. А. и др. Правила тяговых расчётов для поездной работы. — М.: Транспорт, 1985. — 287 с.
6. Коссов Е. Е., Силота А. Г. Моделирование поездной работы магистрального локомотива // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — № 4. — 2018. — С. 218–221. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35447991>. Доступ 12.06.2019.
7. Qianfan, Xin. Diesel Engine System Design. 1st ed., Woodhead Publishing, 26 May 2011, 1088 p. [Электронный ресурс]: <https://www.elsevier.com/books/diesel-engine-system-design/xin/978-1-84569-715-0>. Доступ 17.05.2019.
8. Балабин В. Н. Эффективность эксплуатации маневровых и промышленных локомотивов с гидравлической и электрической передачей // Транспорт Российской Федерации. — № 3. — 2011. [Электронный ресурс]: <http://rostransport.com/transportrf/pdf/34/67-69.pdf>. Доступ 10.06.2019.
9. Навигационные системы. [Electronic resource]: <https://www.glonass-expert.ru/products/monitoring-transporta/solutions/kontrol-zh-d-transporta/kontrol-teplovozov> Доступ 27.07.2020.
10. Cognitive Pilot. [Electronic resource]: <https://habr.com/en/company/cognitivepilot/blog/499440/>. Доступ 27.07.2020.
11. Лапицкий В. Н., Амосов Е. А. Повышение энергетической эффективности локомотивов // Информо. [Электронный ресурс]: <https://www.informio.ru/publications/id2705/Povyshenie-yenergeticheskoy-effektivnosti-lokomotivov>. Доступ 25.06.2019.
12. Railfaneurope.net. The European Railway Server. Stock Lists. [Electronic resource]: http://www.railfaneurope.net/list_frameset.html. Доступ 07.06.2019. ●