



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья  
УДК 629.424.2 + 629.4.016.2  
EDN: <https://elibrary.ru/ndvsgt>



## Энергоэффективность различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на частично электрифицированных маршрутах

К. М. Попов✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),  
Москва, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрена эксплуатация межрегиональных экспрессов, обслуживаемых электрическим моторвагонным подвижным составом, часть маршрута которых проходит по неэлектрифицированным участкам. На этих участках тягу электропоезда осуществляет пассажирский тепловоз, который обеспечивает также электропитание собственных нужд электропоезда и системы поддержания микроклимата в салонах. Цель исследования — сравнение энергетических показателей различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на смешанных маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки.

**Материалы и методы.** Проанализированы достигнутые в эксплуатации значения расхода топливно-энергетических ресурсов для ряда электрифицированных и неэлектрифицированных участков, в том числе связанные с обеспечением энергетических потребностей на собственные нужды электрического моторвагонного подвижного состава и работу систем поддержания микроклимата в салонах. Осуществлено сравнение энергозатрат при использовании на этих участках различных серий тягового подвижного состава.

**Результаты.** Получены данные по расходу топлива для тепловоза с электропоездом и дизель-поезда в зависимости от составности и времени года, а также показатели удельного расхода топлива для тепловоза, ведущего электропоезд, и дизель-поезда в зоне отрицательных температур, т. е. при гарантированно включенном отоплении.

**Обсуждение и заключение.** Показано, что использование тепловоза для тяги электропоезда по энергозатратам менее выгодно, чем использование дизель-поезда. Приведенные в статье сравнительные характеристики энергозатрат при различных вариантах эксплуатации моторвагонного подвижного состава на неэлектрифицированных участках являются предварительной оценкой. При сохранении актуальности данных исследований следующим этапом должна стать обработка данных от бортовых систем регистрации и проведение сравнительных испытаний.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моторвагонный подвижной состав, энергетическая эффективность, альтернативный вариант эксплуатации, система электроснабжения состава, система обеспечения микроклимата, данные маршрутов машиниста

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Попов К. М. Энергоэффективность различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на частично электрифицированных маршрутах // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 9–23.

✉ [pkmih@mail.ru](mailto:pkmih@mail.ru) (К. М. Попов)

© Попов К. М., 2024



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.424.2+629.4.016.2

EDN: <https://elibrary.ru/ndvsgt>



## Energy efficiency of different modes of motor-car rolling stock operation on partially electrified routes

Kirill M. Popov✉

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper considers the operation of interregional express trains operated by electric motor-car rolling stock whose route partly runs along non-electrified sections. These sections have electric trains hauled by a passenger diesel locomotive that also supplies electricity for the electric train auxiliary needs and the cabin microclimate system. The research is intended to compare the energy indicators of different modes of motor-car rolling stock operation on mixed routes with electrified and non-electrified sections.

**Materials and methods.** The paper analyses the actual operational consumption of fuel and energy resources for a number of electrified and non-electrified sections, including electricity supply for auxiliary needs of electric motor-car rolling stock and the cabin microclimate system. The paper compares the energy consumption of these sections for different series of tractive rolling stock.

**Results.** The author obtained data on the fuel consumption of a diesel locomotive with an electric train and a diesel train depending on the train composition and time of year, as well as indicators of specific fuel consumption for a diesel locomotive driving an electric train and a diesel train in negative temperature zones, i. e. with operating heating.

**Discussion and conclusion.** The study shows that a diesel locomotive for electric train traction is less feasible than a diesel train in terms of energy consumption. The author gives a preliminary assessment of comparative characteristics of energy consumption under different modes of motor-car rolling stock operation on non-electrified sections. If these research data remain relevant, the next stage should include data processing from on-board registration systems and comparative testing.

**KEYWORDS:** motor-car rolling stock, energy efficiency, alternative operation mode, train electric power supply system, microclimate system, engine driver route data

**FOR CITATION:** Popov K. M. Energy efficiency of different modes of motor-car rolling stock operation on partially electrified routes. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):9-23. (In Russ.).

✉ [pkmih@mail.ru](mailto:pkmih@mail.ru) (K. M. Popov)

© Popov K. M., 2024

**Введение.** Энергетические преимущества моторвагонного подвижного состава (МВПС) перед локомотивной тягой в пригородном пассажирском движении хорошо известны [1, 2], и при наличии в рабочем парке депо электро- и дизель-поездов они широко используются на пригородных маршрутах. В межрегиональных пассажирских перевозках эффективность МВПС не столь очевидна и связана с заложенной в расписание максимальной скоростью, количеством остановок, а также протяженностью маршрута и, соответственно, временем в пути, которое пассажиры готовы провести в преимущественно сидячем положении. В последние годы дополнительным аргументом в пользу использования МВПС на межрегиональных маршрутах стало появление комфортабельных электропоездов разных модификаций ЭС1, ЭС1П, ЭС2ГП (далее — ЭС) с повышенной до 160 км/ч скоростью — максимальной в сравнении с традиционными сериями МВПС. С появлением этих поездов связан и ввод в эксплуатацию экспрессов, часть маршрута следующих по неэлектрифицированным участкам. На последних тягу ЭС осуществляет пассажирский тепловоз ТЭП70БС.

С 2018 г. такая технология используется на участках Владимир — Иваново, с 2020 г. — Санкт-Петербург — Валдай — Старая Русса, с 2021 г. — Волоколамск — Муравьёво, с 2023 г. — Иваново — Нижний Новгород. При этом системы собственных нужд, включая обеспечение микроклимата в салонах МВПС, получают питание от дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза, для передачи электроэнергии используется специальная двухпроводная система энергоснабжения [3]. Когда тепловоз с номинальной мощностью дизеля 2940 кВт, предназначенный для тяги пассажирских составов массой 1000 т и более, эксплуатируется с поездами массой около 300 т, он не всегда работает с полной нагрузкой, а значит, в оптимальных по расходу топлива режимах. Однако номинальная мощность 5-вагонного ЭС, составляющая 2560 кВт, сопоставима с тяговой мощностью тепловоза ТЭП70БС (2040 кВт), остающейся после вычета мощности системы электропитания состава (СЭС). Это позволяет тепловозу ТЭП70БС при тяге ЭС реализовывать сопоставимую с самостоятельно движущимся ЭС максимальную скорость движения, хотя на разгонную динамику будет дополнительно влиять инерционность дизеля при наборе им мощности.

При этом открытым остается вопрос, с какой эффективностью вырабатывается электроэнергия для

собственных нужд ЭС, включая систему обеспечения микроклимата.

Отметим, что опыт тяги МВПС магистральными тепловозами не нов. Помимо практиковавшейся в 90-е гг. тяги магистральными тепловозами дизель-поездов, имеющих определенные неисправности, можно вспомнить дизель-поезда ДДБ1 [4], построенные в 2004–2005 гг. для Белорусской железной дороги. Все 20 составов до сих пор эксплуатируются. Это поезда постоянного формирования, т. е. моторных вагонов в составе ДДБ1 нет и секция тепловоза М62 или М62У постоянно соединена с прицепными вагонами от электропоезда. Неизменность схемы формирования определяется тем, что ДДБ1 не выезжают на электрифицированные участки.

Возникновение вопроса об эффективности тяги МВПС тепловозами ТЭП70БС связано с появлением в 2019 г. сопоставимого по комфорту с ЭС современного дизель-поезда РА-3. Также актуальность исследования обусловлена постоянно растущими ценами на дизельное топливо и необходимостью поиска резервов его экономии.

Целью исследования является сравнение энергетических показателей различных вариантов эксплуатации МВПС на смешанных маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки. Результаты исследования могут стать составной частью технико-экономической оценки этих вариантов.

**Особенности существующих и перспективных систем энергоснабжения пассажирских вагонов.** При рассмотрении вариантов организации пассажирских перевозок на неэлектрифицированных маршрутах важным моментом является эффективность энергоснабжения системы поддержания микроклимата в салонах и, в случае использования МВПС, энергоснабжения прочих собственных нужд.

Исследования по данному вопросу проводились в двух направлениях: получение электропитания от тепловоза и от специализированных вагонов (вагонов-электростанций). В последнем случае следует оговориться, что ранее вагоном-электростанцией считался вагон, на котором содержалось электрическое оборудование для преобразования постоянного напряжения 3 кВ (от электропоезда) в трехфазное переменное 380/220 В<sup>1</sup>. В настоящее время вагон-электростанция — это вагон с одним или несколькими дизель-генераторами для непосредственной выработки электроэнергии [5].

Первым отечественным тепловозом с СЭС был опытный тепловоз ТЭП75. Серийно СЭС появилась на

<sup>1</sup> Вагон-электростанция [Электронный ресурс]. URL: [http://cmzt.narod.ru/news/vagon\\_ehlektrostancaija\\_chast\\_2/2022-12-04-1445](http://cmzt.narod.ru/news/vagon_ehlektrostancaija_chast_2/2022-12-04-1445) (дата обращения: 15.12.2023).

тепловозе ТЭП70БС. Особенностью СЭС на данном тепловозе является то, что при ее работе минимальная частота вращения коленчатого вала дизеля на холостом ходу увеличивается с 350 до 675 мин<sup>-1</sup>, а тяговая мощность тепловоза снижается с 2670 до 2040 кВт [6], т. е. почти на четверть (23,6%). Еще до начала серийного выпуска тепловозов с СЭС были предложены проектные технические решения [7, 8], направленные на повышение ее эффективности. В [7] оговаривалось снижение в эксплуатации минимальной позиции контроллера при работе СЭС вплоть до второй, с учетом распределения потребной мощности отопления по времени года, определяемой изменением температуры атмосферного воздуха. В [8] было предложено перераспределять мощность дизель-генератора между мощностью на тягу тепловоза и мощностью на СЭС путем поддержания суммарного значения, соответствующего минимальному удельному эффективному

расходу топлива. Указанное перераспределение, по мнению авторов, могло быть обеспечено в том числе за счет варьирования мощности СЭС с ограничением по снижению температуры в вагонах не ниже 18 °С. В [6] была приведена расчетная экономия топлива: до 6,5% — на стоянке, 1,5–2% — в поездке. В [8] аналогичная величина оценена на уровне 0,5–1,5%.

В качестве альтернативы электрическому отоплению в [9] был предложен проект энергоснабжения вагонов от тепловоза ТЭП70БС, выполненный по технологии, схожей с применявшейся на дизель-поездах Д1 и ДР1, но с использованием теплоты не воды, охлаждающей дизель, а отработавших газов дизеля.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики различных СЭС.

Максимальная мощность, потребляемая системой отопления 5-вагонного ЭС, составляет 315 кВт, с учетом других собственных нужд ЭС (мотор-компрессор,

Таблица 1

Сравнительные характеристики различных СЭС

Table 1

Comparative characteristics of different train power supply systems

Варианты системы энергоснабжения	Номинальная мощность, кВт	Преимущества по сравнению с исходной СЭС	Недостатки
Штатная ТЭП70БС, однопроводная (исходная система)	600	—	Минимальная позиция контроллера при работе СЭС — шестая, что обусловлено влиянием СЭС на СЦБ и необходимостью поддержания минимального напряжения СЭС — 2,6 кВ. Невозможность эксплуатации без модернизации путевых устройств
Проект с пониженной минимальной частотой вращения коленчатого вала дизеля при работе СЭС [7]	588	Максимальное снижение доли работы ДГУ с СЭС в режимах с низкой энергоэффективностью	Невозможность реализации без установки специальных помехоподавляющих фильтров, исключающих влияние СЭС на СЦБ
Проект с оперативным перераспределением мощности на тягу и для СЭС [8]	600		Влияние системы регулирования СЭС на температуру воздуха в вагонах
Штатная ТЭП70БС, двухпроводная	600	Отсутствие влияния на СЦБ, отсутствие необходимости модернизации путевых рельсовых цепей на участках эксплуатации	Необходимость прокладки обратной высоковольтной линии во всех вагонах, эксплуатирующихся с данной системой
Проект [9] с использованием теплоты отработавших газов дизеля	754 (для номинальной мощности ДГУ)	Отсутствие дополнительных затрат топлива на отопление	Расчеты выполнены для номинальной мощности дизеля, доля времени работы на которой в эксплуатации невелика. Необходимость модернизации всех вагонов, эксплуатирующихся с данной системой
Вагон-электростанция [5]	1350 (3×450)	Отсутствие влияние на тяговую мощность локомотива, высокая энергоэффективность за счет стационарного номинального режима работы потребного количества ДГУ	Потребность в операторе для обслуживания вагона, дополнительные затраты топлива на тягу самого вагона-электростанции

освещение, привод дверей и др.), мощность которых в неавтономном режиме существенно меньше номинальной, суммарно — не более 400 кВт. Из табл. 1 видно, что мощность вагона-электростанции в данном случае явно избыточна, а номинальная мощность СЭС тепловоза ТЭП70БС с запасом в примерно  $\frac{1}{3}$  обеспечивает максимально потребляемую ЭС.

С учетом преимуществ и недостатков рассмотренных систем СЭС можно сделать вывод о том, что возможность энергоснабжения при минимальных дополнительных конструктивных изменениях сопутствующих элементов, в том числе и напольного оборудования железных дорог, обеспечивает тепловоз ТЭП70БС с двухпроводной СЭС, т. е. используемый в эксплуатации вариант. В части преимуществ предложения [8] отметим, что согласно руководству по эксплуатации тепловоза ТЭП70БС, мощность, отдаваемая в СЭС, зависит от частоты вращения коленчатого вала  $n_d$  и температуры наружного воздуха  $\tau$ : максимальная мощность (600 кВт) обеспечивается при номинальной  $n_d$  и  $\tau$  от 0 и ниже, минимальная мощность (250 кВт) — при  $n_d = 0,7$  от номинальной и  $\tau$  выше  $15^\circ\text{C}$ . Ниже будут рассмотрены достигнутые в эксплуатации затраты топлива на СЭС, в том числе в сравнении с расчетными значениями.

**Действующие и альтернативные варианты эксплуатации МВПС.** Основную действующую в настоящее время схему обслуживания МВПС смешанных маршрутов, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки, при сравнительном анализе рассмотрим в сопоставлении с альтернативными вариантами, связанными с изменением используемой серии МВПС. Альтернативами текущему варианту при использовании ЭС (вариант 1), с меньшим временем реализации, можно рассматривать варианты, практиковавшиеся до начала эксплуатации ЭС:

- пересадку пассажиров на станции, где заканчивается электрификация, с электропоезда на дизель-поезд (вариант 2),
- движение дизель-поезда на всем маршруте (вариант 3).

Примером варианта 3 может служить многолетняя эксплуатация дизель-поездов на участке Москва — Узловая и относительно недавний запуск туристических дизель-поездов Москва — Переславль-Залесский. Однако вариант 3 не отвечает современной экологической повестке. Поэтому в качестве более отдаленной по времени реализации альтернативой может рассматриваться предложенная в [10] перспективная технология модернизации ЭС путем установки тяговых аккумуляторных батарей (вариант 4). После указанной модернизации, по заявлениям авторов проекта, будет возможно эксплуатировать ЭС на неэлектрифицированных участках протяженностью до 150 км с максимальной скоростью до 140 км/ч.

Таблица 2

Варианты эксплуатации МВПС на маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки

Table 2

Modes of motor-car rolling stock operation on routes with electrified and non-electrified sections

Вариант	Серия МВПС на электрифицированной части маршрута	Серия МВПС на неэлектрифицированной части маршрута
1 (базовый)	ЭС	ЭС с тепловозом ТЭП70БС во главе поезда
2	ЭС	РА-3 (пересадка пассажиров)
3	РА-3	РА-3
4	ЭС	ЭС с накопителями энергии

Отметим, что в основном используемом варианте эксплуатации (вариант 1) стоянка ЭС на станции окончания электрификации в ожидании прицепки в голову поезда тепловоза составляет не менее 20 мин. Если рассматривать вариант дружественной к пассажирам пересадки с электропоезда на дизель-поезд, стоящий на соседнем пути, т. е. в пределах одной и той же платформы, имеющей защиту от атмосферных осадков, то потери времени при стоянке на станции окончания электрификации можно сократить в 3–4 раза. Если при этом сохранить общее время в пути, то станет возможно снизить среднюю скорость движения, а значит, и энергозатраты. Особенности рассмотренных вариантов показаны в табл. 2.

Возможность более детализированного сравнения рассматриваемых вариантов определим далее с учетом достигнутых показателей текущей эксплуатации по базовому варианту, а также изучения конструктивных особенностей сопоставляемых серий МВПС.

**Параметры текущей эксплуатации МВПС на маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки.** Для определения возможности сравнения энергетических характеристик эксплуатации электропоездов серии ЭС и дизель-поездов РА-3, помимо основных идентификационных характеристик участков их эксплуатации, приведем также те характеристики, которые напрямую влияют на расход электроэнергии и топлива. Это параметры организации движения поездов и профиля пути, которые сведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что на участках с электрификацией движение ЭС реализовано с большими скоростями, чем на неэлектрифицированных, на последних параметры движения ЭС сопоставимы с достигаемыми на участках эксплуатации РА-3. Стоит учесть, что увеличение времени движения за счет сокращения времени 20-минутной стоянки на станциях окончания электрификации позволит снизить среднюю

Таблица 3

Характеристики отдельных участков эксплуатации поездов ЭС и РА-3

Table 3

Characteristics of individual sections of operation of ES and RA-3 trains

Наименование показателей	Участок эксплуатации									
	Москва — Иваново		Санкт-Петербург — Валдай — Старая Русса			Москва — Муравьёво		Кинешма — Иваново (экспресс)	Курск 1 — Воронеж	Москва — Узловая
	Москва — Владимир	Владимир — Иваново	Санкт-Петербург — Бологое	Бологое — Валдай	Бологое — Валдай — Старая Русса	Москва — Волоколамск	Волоколамск — Муравьёво			
Электрификация	есть	нет	есть	нет	нет	есть	нет	нет	нет	около 50% длины
Серия тягового подвижного состава	ЭС1П	ТЭП70БС+ЭС1П	ЭС1П/ЭС2ГП	ТЭП70БС+ЭС1П/ЭС2ГП	ТЭП70БС+ЭС1П/ЭС2ГП	ЭС1П/ЭС2ГП	ТЭП70БС+ЭС1П	РА-3	РА-3	РА-3
Основная составность, вагонов	5	5	5	5	5	5	5	3	2	2
Длина участка, км	191	144	319	50	172	129	117	92	246	239
Средняя техническая скорость, км/ч	116	91	117	65	63	61	65	55	83	63,7
Общее время движения (в одну сторону), ч	1,65	1,58	3,47	0,8	2,92	1,9	1,9	1,8	3	3,75
Количество остановок в пути следования (в одну сторону)	0	1	13	1	6	2	6	5	5	4
Доля элементов 3% и менее, %	63	58	76	66	76	26	39	44	34	32
Тип профиля по классификации в [11]	I	II	I	II	I	IV	III	II	III	III

скорость движения при сохранении суммарного времени в пути. Довольно высокая максимальная скорость на участке Москва — Владимир обусловлена хорошим состоянием пути (на этом участке эксплуатировались в том числе высокоскоростные поезда ЭВС2) и его не сложным профилем.

Достигнутые значения энергозатрат на тягу были получены на основе обработки данных по исходной выборке из более 3500 маршрутов машиниста, выгруженных из автоматизированной системы централизованной обработки маршрутов машиниста (АС ЦОММ). Эта выборка включала данные за период с января по сентябрь 2023 г. по ранее указанным (табл. 3) участкам. Для каждого календарного месяца были определены средние значения абсолютного и удельного, отнесенного к перевозочной работе, расхода

топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а также средние квадратические отклонения (СКО). На основе правила «трех сигм» были исключены из дальнейшего рассмотрения выбросы — поездки с, вероятно, ошибочным расходом ТЭР. Также по указанным месяцам на основе общедоступного архива погоды<sup>2</sup> и усреднения температуры для конкретного участка по метеостанциям, расположенным в его границах, были определены средние за месяц значения температуры атмосферного воздуха. С использованием этих данных были построены зависимости удельного расхода электроэнергии (рис. 1) и топлива (рис. 2, 3) от температуры, отдельно для электрической и дизельной тяги, в последнем случае — отдельно для ТЭП70БС (рис. 2) и РА-3 (рис. 3).

В табл. 4 приведены средние энергозатраты на поездку по конкретному участку в обе стороны по тем

<sup>2</sup> rp5.ru. Расписание погоды: [сайт]. URL: <https://rp5.ru>.

календарным месяцам, в которых они являются минимальными из рассмотренных, а также разница со значениями по месяцам, в которых эти энергозатраты являются максимальными. Эта разница в наибольшей степени должна определяться отличиями в режиме работы системы обеспечения микроклимата.

Из рис. 1 видно, что на участках Москва — Владимир и Санкт-Петербург — Бологое удельный расход электроэнергии выше, чем на участке Москва — Волоколамск. Это во многом может быть объяснено существенным отличием значений средней технической скорости. Из табл. 3 видно, что на участках Москва — Владимир и Санкт-Петербург — Бологое она практически совпадает и равна 116 и 117 км/ч соответственно, а на участке Москва — Волоколамск ее величина практически в два раза ниже — 61 км/ч. Анализируя полученные результаты, важно учитывать, что в настоящем исследовании, как и в существующей отчетности, расчет удельного расхода ТЭР осуществляется на основе перевозочной работы, определенной не по фактической массе МВПС, которая в маршрутах машиниста не фиксируется, а для постоянной учетной массы, соответствующей номинальной населенности поезда. При этом известно, что расход ТЭР во многом зависит от фактической населенности, которая может изменяться во времени.

Сравнение рис. 2 и 3, а также данных в табл. 4 показывает, что удельный расход топлива на участках с локомотивной тягой выше, чем на участках эксплуатации РА-3. Однако прямое сравнение этих расходов для оценки энергоэффективности некорректно, так как на рассматриваемых неэлектрифицированных участках присутствуют разные эксплуатационные условия, определяющие указанный расход топлива. Таким образом, требуется соответствующее приведение значений этого расхода, компенсирующее разницу наиболее значимых факторов.

**Сравнение энергозатрат при различных вариантах эксплуатации МВПС.** В первом приближении выполним прямое сравнение энергозатрат самостоятельно движущегося электропоезда ЭС и дизель-поезда РА-3 для участков Москва — Волоколамск и Москва — Узловая, имеющих сопоставимые характеристики профиля пути и условия движения (табл. 3). Согласно табл. 4 значения среднего удельного расхода ТЭР для месяца с минимальным его значением  $b_{\min}$  для этих участков составляют 190 кВт·ч/изм. и 57,6 кг/изм. соответственно. После перевода в единицы условного топлива получаем 23,3 кг у.т./изм. и 83,5 кг у.т./изм. соответственно. Полученная разница в 3,6 раза характеризует во многом разницу КПД. Это позволяет сделать в принципе очевидный вывод, что с энергетической точки зрения использование дизель-поезда РА-3 на электрифицированном участке Москва — Волоколамск невыгодно. Поскольку экономическая

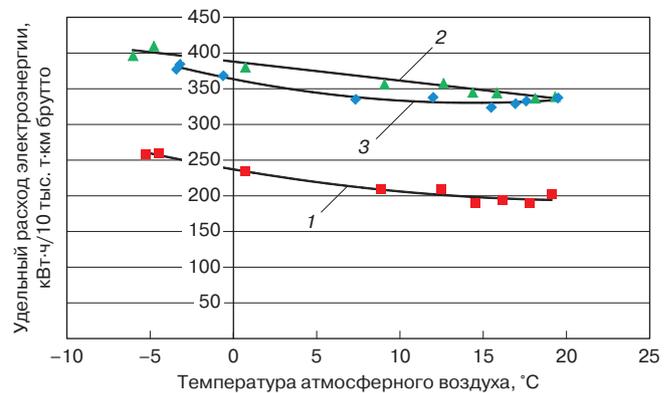


Рис. 1. Расход электроэнергии ЭС на тягу в зависимости от температуры за период январь—сентябрь 2023 г.: 1 — Москва—Волоколамск; 2 — Москва—Владимир; 3 — Санкт-Петербург — Бологое

Fig. 1. Electricity consumption by ES electric train for traction depending on temperature from January to September 2023: 1 — Moscow—Volokolamsk; 2 — Moscow—Vladimir; 3 — Saint Petersburg—Bologoye

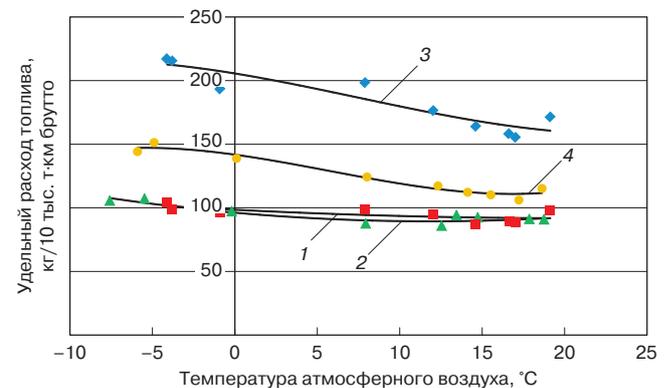


Рис. 2. Расход топлива ТЭП70БС на тягу ЭС в зависимости от температуры за период январь—сентябрь 2023 г.: 1 — Бологое — Старая Русса; 2 — Иваново — Владимир; 3 — Бологое — Валдай; 4 — Волоколамск — Муравьёво

Fig. 2. Fuel consumption by diesel locomotive ТЭП70БС for ES electric train traction depending on temperature from January to September 2023: 1 — Bologoye — Staraya Russa; 2 — Ivanovo — Vladimir; 3 — Bologoye — Valday; 4 — Volokolamsk — Muravyovo

оценка, для которой важна также разность стоимостей дизельного топлива и электроэнергии и другие затраты, выходит за рамки настоящего исследования, дальнейшее сравнение энергозатрат будет осуществляться применительно к неэлектрифицированным участкам.

Параметрами расписания движения, которые будут определять разность энергозатрат, являются средняя техническая скорость и количество остановок.

Соответствующие показатели влияния и изменения удельного расхода ТЭР, позволяющие учесть разницу этих факторов для пассажирского поезда с локомотивной тягой, которым является ЭС, ведомый тепловозом ТЭП70БС, определим на основе [12].

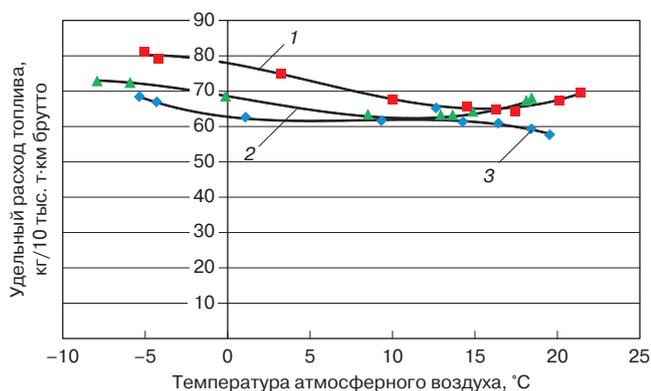


Рис. 3. Расход топлива РА-3 на тягу в зависимости от температуры за период январь–сентябрь 2023 г.: 1 – Курск – Воронеж; 2 – Кинешма – Иваново; 3 – Москва – Узловая

Fig. 3. Fuel consumption by diesel train RA-3 for traction depending on temperature from January to September 2023: 1 – Kursk – Voronezh; 2 – Kineshma – Ivanovo; 3 – Moscow – Uzlovaya

Показатель влияния средней технической скорости, (кг/изм.)/км/ч, определим по формуле

$$k_v = \frac{2,36}{\eta K_{эф}} (1 + \alpha_p) \frac{P_{cp}}{Q_{cp}} (b' + 2c'v_t) + \frac{2,36}{\eta K_{эф} q} \times (b'' + 2c''v_t) - b_{xvo} \frac{P_{cp}}{P_o} \frac{1}{v_t^2 Q_{cp}} \left( \frac{1}{K_{уч}} - 1 \right) 10^4 + \frac{9,1 \cdot 10^{-3} n_{ост}^{уд} 2v_t}{\eta K_{эф} L} \left( \frac{P_{cp}}{Q_{cp}} + 1 \right), \quad (1)$$

где  $\eta$  – паспортное значение КПД тепловоза;  $K_{эф}$  – коэффициент энергетической эффективности;  $\alpha_p$  – коэффициент одиночного пробега тепловоза;  $P_{cp}$  – масса осредненного локомотива, т;  $Q_{cp}$  – средняя масса поезда, т;  $b'$  и  $c'$  – коэффициенты при уравнении удельного сопротивления движению локомотива;  $v_t$  – средняя техническая скорость, км/ч;  $q$  – нагрузка на ось вагона, т;  $b''$  и  $c''$  – коэффициенты при уравнении

Таблица 4

Характеристики энергопотребления на отдельных участках эксплуатации поездов ЭС1 и РА-3 за период январь–сентябрь 2023 г.

Table 4

Characteristics of energy consumption at individual sections of operation of ES1 and RA-3 trains from January to September 2023

Параметр	Участок эксплуатации									
	Москва – Иваново		Санкт-Петербург – Валдай – Старая Русса			Москва – Муравьёво		Кинешма – Иваново	Курск 1 – Воронеж	Москва – Узловая
	Москва – Владимир	Владимир – Иваново	Санкт-Петербург – Бологое	Бологое – Валдай	Бологое – Валдай – Старая Русса	Москва – Волоколамск	Волоколамск – Муравьёво			
Средний расход ТЭР на поездку* для месяца с минимальным его значением $B_{min}$	3920 кВт·ч	730 кг	6300 кВт·ч	465 кг	915 кг	1480 кВт·ч	966 кг	194 кг	368 кг	322 кг
Коэффициент вариации расхода, %	7,3	12,5	5,5	6,9	7,1	11,3	10,9	7,2	9,0	16,8
Средний удельный расход ТЭР для месяца с минимальным его значением $b_{min}$	338 кВт·ч/изм.**	84,9 кг/изм.	330 кВт·ч/изм.	155 кг/изм.	89 кг/изм.	190 кВт·ч/изм.	106 кг/изм.	60,9 кг/изм.	63,4 кг/изм.	57,6 кг/изм.
Максимальная разница среднего расхода ТЭР за поездку* по месяцам $\Delta B$	880 кВт·ч	190 кг	1020 кВт·ч	185 кг	155 кг	540 кВт·ч	411 кг	40 кг	104 кг	56 кг
Максимальный процент изменения удельного расхода ТЭР по месяцам $\Delta \bar{b}$	18	21	14	29	15	27	30	17	22	15

\* В обе стороны.

\*\* Здесь и далее изм. – измеритель перевозочной работы (10 тыс. т·км брутто).

удельного сопротивления движению вагонов;  $b_{\text{ххо}}$  — часовой расход топлива при работе дизеля тепловоза на холостом ходу, кг/ч;  $P_o$  — масса локомотива, выполняющего основной объем перевозок на участке, т;  $K_{\text{уч}}$  — коэффициент участковой скорости;  $n_{\text{ост}}^{\text{уд}}$  — количество остановок, приходящихся на один поезд;  $L$  — длина расчетного участка, км.

Изменение удельного расхода топлива, определяемое разностью скоростей движения  $\Delta v_{\text{т}}$ , кг/изм.:

$$\Delta b_v = k_v \Delta v_{\text{т}}. \quad (2)$$

Показатель влияния количества остановок, (кг/изм.)/остановка [13]:

$$k_{n_{\text{ост}}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3} v_{\text{т}}^2}{\eta K_{\text{эф}} L} \left( \frac{P_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} + 1 \right). \quad (3)$$

Изменение удельного расхода топлива, определяемое разностью количества остановок  $\Delta n_{\text{ост}}$ , кг/изм.:

$$\Delta b_{n_{\text{ост}}} = k_{n_{\text{ост}}} \Delta n_{\text{ост}}. \quad (4)$$

Выражения (1)–(4) позволяют привести удельный расход топлива тепловозом ТЭП70БС, осуществляющим тягу ЭС, к параметрам расписания на участках эксплуатации дизель-поезда РА-3 для сравнения с удельным расходом топлива последним. Хорошо известно, что на энергозатраты немалое влияние оказывают также характеристики профиля пути. Поскольку принятые при расчетах допущения позволяют получить больше качественную, нежели количественную оценку, с учетом отмеченного ранее отличия результатов на рис. 2 и 3, для сравнения отобраны пары участков с условием, что профиль участка эксплуатации ЭС с ТЭП70БС должен быть не сложнее профиля участка эксплуатации дизель-поезда РА-3. Таким образом, дизель-поезд РА-3 при сравнении окажется либо в сопоставимых, либо в худших условиях.

Общими для всех сравниваемых ниже вариантов будут следующие исходные данные, необходимые для вычислений по выражениям (1) и (3):

- $\eta = 0,3$ ;  $P_{\text{ср}} = P_o = 135$  т;  $b_{\text{ххо}} = 16,2$  кг/ч (по данным руководства по эксплуатации на тепловоз ТЭП70БС);

- $Q_{\text{ср}} = 300$  т (учетная масса ЭС, используемая при обработке маршрутов машиниста), соответственно, с учетом количества осей у ЭС,  $q = 15$  т/ось;

- $b' = 0,11$ ;  $c' = 0,0023$  (по данным ПТР<sup>3</sup>);

- $b'' = 0,0605$ ;  $c'' = 0,00284$  (получено на основе данных ООО «Уральские локомотивы»).

Значения  $\alpha_{\text{р}}$  и  $K_{\text{эф}}$  с учетом имеющихся исходных данных в расчетах приняты равными 1, значения  $n_{\text{ост}}^{\text{уд}}$  и  $L$  приведены в табл. 3.

Значения  $K_{\text{уч}}$  получены из расписания и составляют для участков Владимир — Иваново и Бологое — Валдай — 0,96, для участка Бологое — Старая Русса — 0,92 и для участка Волоколамск — Муравьёво — 0,88.

Пары участков, для которых выполнено сравнение удельного расхода топлива с учетом его приведения, указаны в табл. 5. В этой же таблице приведены рассчитанные значения показателей влияния, разности учитываемых факторов и соответствующие изменения удельного расхода топлива.

С использованием данных табл. 5 можно определить, что удельный расход топлива  $b_{\text{мин}}$  на участке Владимир — Иваново (см. табл. 4), скорректированный на меньшую скорость и большее количество остановок, соответствующих участку Курск 1 — Воронеж, составит  $84,9 - 17,8 + 8,4 = 75,5$  кг/изм. Вычтем из этой величины дополнительный расход, определяемый простым ТЭП70БС с ЭС при обороте на участке Владимир — Иваново (в среднем — 2 ч) —  $6,5$  кг/изм., в результате получим  $69$  кг/изм. При этом значение  $b_{\text{мин}}$  на участке Курск 1 — Воронеж равно  $63,4$  кг/изм., т. е. на  $8,1\%$  ниже. Как видим, отличие значимое, и это без учета более сложного профиля пути (см. табл. 3) на участке Курск 1 — Воронеж.

Схожий с участком Бологое — Валдай профиль пути присутствует на участке Кинешма — Иваново (для данного участка отобраны маршруты машиниста только поездов-экспрессов). Значение  $b_{\text{мин}}$  на участке Бологое — Валдай, скорректированное на меньшую скорость и большее количество остановок, соответствующих участку Кинешма — Иваново, составит  $155 - 17,8 + 10,6 = 147,8$  кг/изм. Также надо учесть, что у ТЭП70БС, задействованных для тяги ЭС на участке Бологое — Валдай, присутствует  $7,5$  ч простоя, из них около  $6$  ч совместно с ЭС. В последнем случае расход топлива выше за счет обеспечения электропитания ЭС. В среднем для данного участка за счет указанного простоя удельный расход топлива, при довольно малой перевозочной работе, увеличивается на  $70$  кг/изм. Соответственно, разница с  $b_{\text{мин}}$  на участке Кинешма — Иваново ( $60,9$  кг/изм.) составляет  $22\%$ . Как видим, местные условия обслуживания поездов существенно влияют на уровень энергозатрат.

Учитывая меньшее время простоя ТЭП70БС при эксплуатации на участке Бологое — Старая Русса (в среднем —  $3,5$  ч, из них с ЭС — около  $2$  ч.), также произведено сравнение затрат топлива на этом участке и участке Кинешма — Иваново. Значение  $b_{\text{мин}}$  на участке Бологое — Старая Русса, скорректированное на меньшую скорость и меньшее количество остановок, соответствующих участку Кинешма — Иваново, составит  $89 - 13,2 - 0,8 = 75$  кг/изм. Вычтем из этой

<sup>3</sup> Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. М.: ОАО «РЖД», 2016. 516 с.

Таблица 5

Расчетные параметры приведения расхода топлива для сравниваемых участков

Table 5

Estimated fuel consumption conversion parameters for the compared sections

Участок эксплуатации ЭС с ТЭП70БС	Участок эксплуатации РА-3	$k_{\nu}$ , (кг/изм.)/км/ч	$\Delta v_{\tau}$ , км/ч	$\Delta b_{\nu}$ , кг/изм.	$k_{\text{ост}}$ , (кг/изм.)/ост-ка	$\Delta n_{\text{ост}}$ , ед.	$\Delta b_{\text{ост}}$ , кг/изм.
Владимир — Иваново	Курск 1 — Воронеж	2,227	−8	−17,8	2,1	+4	+ 8,4
Бологое — Валдай	Кинешма — Иваново	1,782	−10	−17,8	2,66	+4	+ 10,6
Бологое — Старая Русса	Кинешма — Иваново	1,655	−8	− 13,2	0,773	−1	−0,8
Волоколамск — Муравьёво	Москва — Узловая	1,705	−1,3	− 2,2	1,525	−2	−3,0

величины также средний расход на простой на участке Бологое — Старая Русса — 8,5 кг/изм. Полученное значение 66,5 кг/изм. на 8,4% выше среднего удельного расхода топлива на участке Кинешма — Иваново.

На участке Волоколамск — Муравьёво отмечен расход  $b_{\text{min}}$ , равный 106 кг/изм. при средней скорости движения 65 км/ч. В среднем около 15 кг/изм. из этого расхода определяется наличием 4,5 ч. простоя ТЭП70БС, из которых 2 ч — с электропоездом ЭС. Значение  $b_{\text{min}}$  на участке Волоколамск — Муравьёво с вычетом составляющей на простой и скорректированное на меньшую скорость и меньшее количество остановок, соответствующих участку Москва — Узловая, составит  $106 - 15 - 2,2 - 3,0 = 85,8$  кг/изм. Полученное значение по сравнению с удельным расходом на участке Москва — Узловая (57,6 кг/изм.) выше на 33%.

Во всех сравниваемых случаях удельный расход топлива ТЭП70БС с электропоездом ЭС, приведенный к условиям движения на участках эксплуатации дизель-поезда РА-3, оказался больше, чем удельный расход топлива последним. Учитывая принятые допущения в расчетах, а также существенный разброс расхода топлива в маршрутах машиниста (табл. 4), характеризуемый коэффициентом вариации и определяемый

в том числе и фактором ручной фиксации показаний приборов учета, для предварительной оценки будем ориентироваться на минимальное значение разницы из полученных выше значений, т. е. 8,1%. Получение более точных количественных оценок, в зависимости от степени актуальности настоящих исследований, потребует обработки данных от бортовых систем регистрации, а при их отсутствии — организации опытных поездок в сопоставимых условиях.

**Конструктивные особенности дизель-поезда РА-3 в части энергоэффективности и сопоставления с электропоездом ЭС.** Энергетическая эффективность дизель-поезда РА-3 в эксплуатации, как и любой серии тягового подвижного состава, связана с рядом конструктивных особенностей. Отличительной особенностью дизель-поезда РА-3 в части системы поддержания микроклимата в пассажирских салонах является комбинированный способ их отопления — с использованием теплоты системы охлаждения дизеля и системы его предпускового прогрева, а также электрических калориферов, получающих питание от специального генератора, номинальная мощность которого с учетом потерь в его гидроприводе составляет около 24% мощности дизеля. Эффективность такого способа выше, чем полностью электрического отопления, но ниже, чем отопления с использованием только тепла от системы охлаждения дизеля [13, 14].

На рис. 3 показано, что режимы эксплуатации системы поддержания микроклимата для участков эксплуатации РА-3 отличаются, что связано в том числе и с населенностью поезда. Управление системой микроклимата после того, как оно включено на пульте машиниста, — автоматическое и корректируется в том числе по сигналу от системы пневматического подвешивания, пропорционального количеству пассажиров.

Сочетание принятой максимальной скорости РА-3 и гидравлической передачи мощности, включающей два гидроаппарата, определяет довольно высокую скорость перехода с режима гидротрансформатора на режим гидромuffты при номинальном режиме работы дизеля (рис. 4). При частичных положениях органа

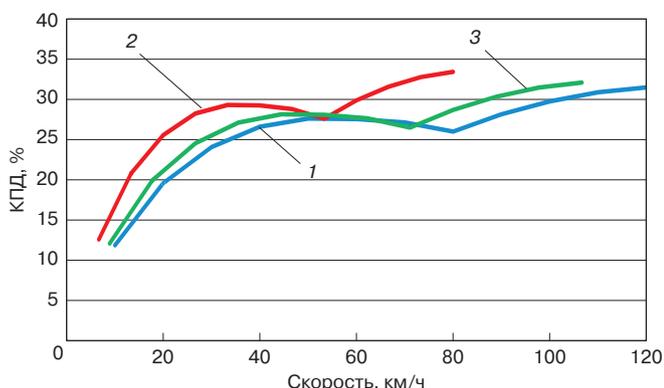


Рис. 4. Зависимость КПД дизель-поезда РА-3 от скорости: 1 — внешняя; 2 — 30% мощности; 3 — 70% мощности

Fig. 4. Dependence of RA-3 diesel train efficiency on speed: 1 — external; 2 — 30% of power; 3 — 70% of power

Таблица 6

Сравнительные технические характеристики электропоездов типа ЭС  
(автономный и ведомый варианты) и дизель-поезда РА-3

Table 6

Comparative technical characteristics of ES electric trains  
(autonomous and driven variants) and diesel train RA-3

Техническая характеристика	ЭС	ЭС с тепловозом ТЭП70БС	РА-3
Основная составность, вагонов	5	5	2, 3 (4–6 по СМЕ*)
Тяговая мощность, кВт	2550	2670 без СЭС 2040 с СЭС	При 2–3 вагонах — 505 (720 по дизелю) При работе по СМЕ* — 1010 (1440 по дизелю)
Разгонное ускорение, м/с <sup>2</sup>	0,64	0,29	0,37 (4 вагона) 0,25 (6 вагонов)
Максимальная скорость движения, км/ч	160	160**	120
Число сидячих мест, ед.			
2 вагона	—	—	145
3 вагона	—	—	241
4 вагона	—	—	290
5 вагонов	443	443	—
6 вагонов	—	—	482
Наличие системы кондиционирования в салонах	да	да	да

\* СМЕ — система многих единиц. Способ управления подвижным составом, при котором в один поезд сцепляется несколько локомотивов или моторных вагонов, а управление двигателями ведется с одного поста управления и одной локомотивной бригадой.

\*\* Для тяги ЭС используют модификацию ТЭП70БС с максимальной скоростью 160 км/ч.

управления топливopодачей, учитывая мало меняющийся от мощности удельный эффективный расход топлива используемого дизеля, характеристика КПД будет практически пропорционально сдвигаться в сторону меньших скоростей. Но упомянутый выше довольно существенный процент отбора мощности дизеля на генератор собственных нужд при средних скоростях, отмеченных на участках эксплуатации РА-3 (табл. 3), может приводить к необходимости движения в режиме гидротрансформатора, имеющего более низкий КПД, чем гидромuфта. Поэтому топливная экономичность РА-3 будет определяться соответствием выбранного режима управления дизелем и текущей скорости движения на том или ином участке пути с учетом его профиля, а также с учетом населенности поезда.

Несмотря на то, что в бортовой системе управления РА-3 реализована функция поддержания заданной машинистом скорости с автоматическим отключением при снижении скорости более 10 км/ч от заданной, наличие качественных режимных карт и мастерство машиниста оказывают немалое влияние на расход топлива в эксплуатации. Косвенно это подтверждает фактический разброс данной величины, характеризуемый коэффициентом вариации (табл. 4), который составляет от 7,2 % на участке Кинешма—Иваново до 16,8 % на участке Москва—Узловая.

Для возможности сопоставления вариантов по табл. 2 дополнительно приведем сравнительные характеристики ЭС и РА-3, определяющие их эксплуатационные возможности. В табл. 6 приведены данные о вариантах составности, тяговой мощности, разгонном ускорении и пассажироместности.

Из табл. 6 видно, что РА-3 может обеспечить сопоставимое с участками эксплуатации электропоездов ЭС при их тяге ТЭП70БС разгонное ускорение, но меньшую максимальную скорость, что связано с меньшей тяговой мощностью. Также данные табл. 6 показывают, что РА-3 в шестивагонной составности сопоставим по вместимости с ЭС. Следует отметить, что среди тех участков эксплуатации РА-3, данные по которым были обработаны (табл. 3), шестивагонная составность эпизодически используется на участке Кинешма—Иваново. По предварительной оценке, удельный расход топлива по сравнению с основной используемой трехвагонной составностью меньше, и разница составляет около 10 %. При накоплении статистики для поездок шестивагонного РА-3 может быть получена более точная оценка, но тенденция должна сохраниться, так как при увеличении количества вагонов в большей степени может быть использована инерция поезда. Отдельно следует указать, что РА-3, в отличие от ЭС, допускает оперативное уменьшение составности, что при снижении пассажиропотока является одним из важных путей экономии топлива.

Таблица 7

Результаты расчетов затрат топлива на питание собственных нужд ЭС от тепловоза ТЭП70БС

Table 7

Calculation results of fuel consumption for power supply of auxiliary needs of ES from diesel locomotive ТЕР70BS

Составляющая	Затраты на собственные нужды ЭС*	Затраты на отопление		Итого	
		Режим 50 %	Режим 100 %	Режим с отоплением 50 %	Режим с отоплением 100 %
Мощность, кВт	30	157	315	187	345
Расчетный часовой расход топлива $b_p$ , кг/ч	7,3	38	76,2	45,2	83,5

\* Без учета систем обеспечения микроклимата и охлаждения неактивного тягового электрооборудования.

**Сравнение достигнутых энергозатрат на соблюдение микроклимата при различных вариантах эксплуатации МВПС.**

Как указано выше, в табл. 4 приведены величины, характеризующие разницу максимального и минимального значений среднего за календарный месяц уровня энергозатрат. Это разница среднего расхода ТЭР на поездку  $\Delta V$  и изменение удельного расхода ТЭР  $\Delta \bar{b}$ . Как видим, значения этих величин широко варьируются на рассмотренных участках. Например, для электрической тяги  $\Delta \bar{b}$  находится в диапазоне от 14 % (участок Санкт-Петербург — Бологое) до 27 % (участок Москва — Волоколамск). Близкое к участку Санкт-Петербург — Бологое значение  $\Delta \bar{b}$  отмечено на участке Москва — Владимир и составляет 18 %. В данном случае можно отметить влияние скорости на рассматриваемую величину: с увеличением скорости  $\Delta \bar{b}$  снижается, что может быть объяснено соответствующим снижением доли влияния фактора температуры в общих энергозатратах. Для дизельной тяги разброс  $\Delta \bar{b}$  составляет от 15 до 30 % для ТЭП70БС и от 15 до 22 % для РА-3.

В части ТЭП70БС тенденция снижения  $\Delta \bar{b}$  при увеличении средней скорости движения сохраняется для всех участков, кроме Бологое — Старая Русса. На данном участке это, вероятно, связано с невысокой населенностью поезда и меньшей степенью использования системы поддержания микроклимата. Для РА-3 однозначной зависимости  $\Delta \bar{b}$  от скорости не прослеживается, что может быть объяснено дополнительным влиянием различия в составности поездов, их населенности и разными диапазонами изменения температуры, что видно из рис. 3.

Как ранее указано, значение  $\Delta \bar{b}$  в наибольшей степени должно определяться отличиями в режиме работы системы обеспечения микроклимата.

С целью дополнительной проверки достигнутых значений затрат топлива на соблюдение микроклимата определим расчетный часовой расход топлива ТЭП70БС, связанный с электроснабжением собственных нужд ЭС, включая систему микроклимата, по формуле

$$b_p = \frac{N_p \cdot 3600}{\eta_{дгв} H_t}, \tag{5}$$

где  $N_p$  — вырабатываемая электрическая мощность, кВт;  $\eta_{дгв}$  — КПД дизель-генератора;  $H_t$  — низшая теплотворная способность дизельного топлива, принята в расчетах 42 500 кДж/кг.

Данные [7] по расходу топлива на отопление ТЭП70БС показывают, что  $\eta_{дгв}$  на позициях контроллера, начиная с седьмой, составляет 35 % и более, при расчетах по формуле (5) принимаем  $\eta_{дгв}$ , равным этому значению. Мощность отопления с учетом особенностей системы регулирования ЭС принята по двум вариантам — 50 и 100 %. Результаты расчетов сведены в табл. 7.

Сопоставим данные табл. 7 со значением часового расхода топлива  $b_q$ , равного отношению значения  $\Delta V$  (табл. 4) ко времени поездки. Для участка Владимир — Иваново  $b_q$  равно 36,8 кг/ч, что не противоречит значениям  $b_p$  и соответствует частичному режиму работы системы отопления (меньше 50% мощности).

Сравним энергозатраты на поддержание микроклимата для вариантов ЭС+ТЭП70БС и РА-3. Очевидно, что такое сравнение допустимо выполнять только в сопоставимых температурных условиях. С точки зрения таких условий среди рассматриваемых участков наиболее близкими являются участки Владимир — Иваново и Кинешма — Иваново, в том числе благодаря совпадению одной из станций, ограничивающей участки. Для участка Кинешма — Иваново максимальное значение удельного расхода ТЭР отмечено в январе 2023 г., а минимальное — в сентябре 2023 г.

Среднемесячные значения температуры атмосферного воздуха в январе 2023 г. на метеостанциях, расположенных по границам данных участков, составили на метеостанции Иваново — минус 7,6 °С, на метеостанции Владимир — минус 7,5 °С, на метеостанции Кинешма — минус 8,3 °С. Аналогичные значения в сентябре — 13,4; 13,7 и 13,9 °С соответственно. На рис. 5 приведено распределение среднесуточных значений температур в январе 2023 г., а на рис. 6 — аналогичное

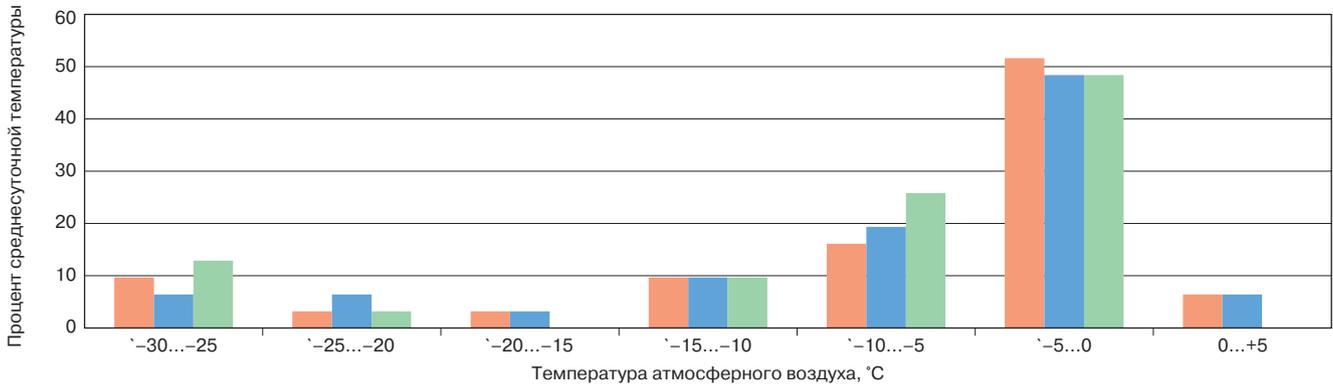


Рис. 5. Распределение значений среднесуточных температур в январе 2023 г.:  
 — Иваново; — Владимир; — Кинешма

Fig. 5. Distribution of average daily temperatures in January 2023:  
 — Ivanovo; — Vladimir; — Kineshma

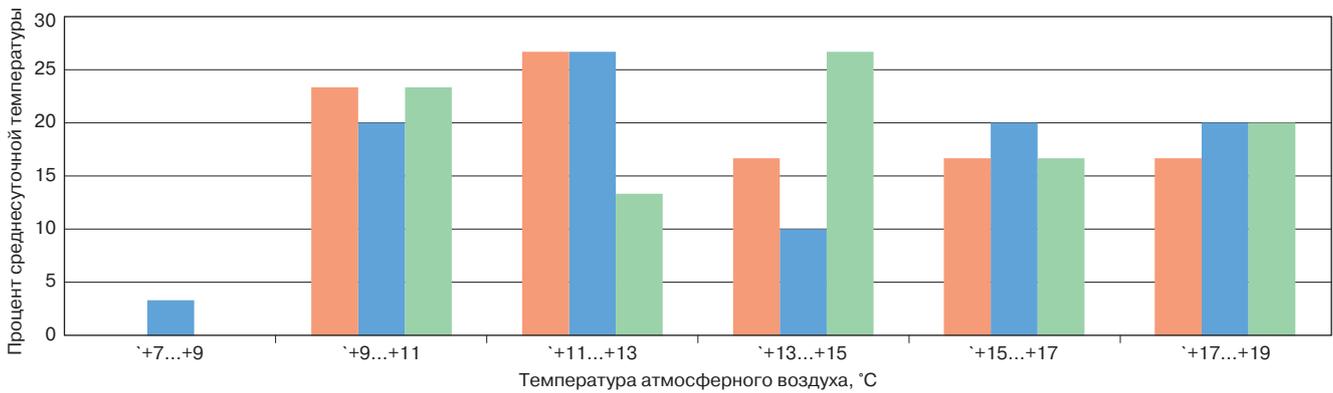


Рис. 6. Распределение значений среднесуточных температур в сентябре 2023 г.:  
 — Иваново; — Владимир; — Кинешма

Fig. 6. Distribution of average daily temperatures in September 2023:  
 — Ivanovo; — Vladimir; — Kineshma

распределение в сентябре 2023 г. Как видим, и средние значения температур, и их распределения вполне сопоставимы друг с другом.

Дополнительный часовой расход  $b_{\text{ч}}$  составил для участка Кинешма — Иваново 11,1 кг/ч. Поскольку это значение соответствует составности, равной трем вагонам (табл. 3), для корректного сравнения с результатом на участке Владимир — Иваново необходимо пропорционально увеличить его до значения, соответствующего составности, равной шести вагонам, сопоставимой, как ранее указано, по расчетной населенности с ЭС, т. е. до 22,2 кг/ч. Отметим, что приведенное в табл. 4 значение  $\Delta B$  для участка Владимир — Иваново соответствует другим месяцам года — февралю и марту, так как расход ТЭР определяется влиянием и других факторов.

Значение  $\Delta B$  на участке Владимир — Иваново, определенное для месяцев, аналогичных использовавшимся при расчете  $\Delta B$  на участке Кинешма — Иваново, составляет 95 кг, что соответствует  $\Delta b_{\text{ч}} = 30,1$  кг/ч. Отличие от ранее определенной  $\Delta b_{\text{ч}}$

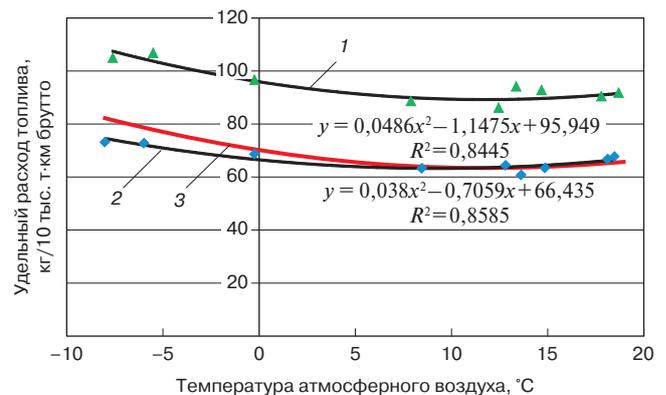


Рис. 7. Регрессионные зависимости удельного расхода топлива от температуры по данным за период январь–сентябрь 2023 г.:  
 1 — Владимир — Иваново; 2 — Кинешма — Иваново;  
 3 — Владимир — Иваново (с приведением вершины параболы к Кинешма — Иваново)

Fig. 7. Regression dependences of specific fuel consumption on temperature based on the data from January to September 2023:  
 1 — Vladimir — Ivanovo; 2 — Kineshma — Ivanovo;  
 3 — Vladimir — Ivanovo (bringing the parabola vertex to Kineshma — Ivanovo)

для участка Кинешма — Иваново составляет 26,2%. Поскольку эта разница в точке, дополнительно на рис. 7 приведены построенные по опытным точкам регрессионные зависимости удельного расхода топлива от температуры для участков Владимир — Иваново и Кинешма — Иваново, а также кривая, соответствующая регрессионной зависимости для участка Владимир — Иваново, смещенная к вершине регрессионной зависимости для участка Кинешма — Иваново.

Из рис. 7 видно, что линия зависимости удельного расхода топлива для ТЭП70БС + ЭС в зоне отрицательных температур, т. е. при гарантированно включенном отоплении, возрастает более интенсивно, чем зависимость для РА-3. Разность удельных расходов топлива для средней температуры января 2023 г. на рассматриваемых участках — минус 7,5 °С, определенная по приведенным на графике регрессионным уравнениям, составляет 7,4 кг/10 тыс. т·км брутто, или 9,1 %.

**Обсуждение и заключение.** Сопоставление данных табл. 3 и 5 позволяет сделать вывод, что использование РА-3 на участке Владимир — Иваново при существующем расписании по его скоростным характеристикам невозможно, а на участках Волоколамск — Муравьево, Бологое — Валдай — Старая Русса вполне допустимо (вариант 2 табл. 2), при этом может потребоваться шестивагонное исполнение РА-3. Характеристики участка и расписание позволяют использовать РА-3 и на участке Москва — Волоколамск, т. е. на всем маршруте Москва — Муравьево (вариант 3 табл. 2), но этот вариант не является перспективным с точки зрения экономии энергоресурсов.

Что касается варианта 4 табл. 2, то по скоростным параметрам расписания и пробегу он может быть перспективным для участка Москва — Иваново из-за наличия не сложного профиля пути, сопоставимого с участками Калининградской железной дороги, для которой был предложен ЭС с накопителями [10]. Для участка Москва — Муравьево, имеющего более сложный профиль пути, требуются дополнительные расчеты по уточнению характеристик накопителей и обоснованию реализации такого проекта.

Известно, что выпуск РА-3 из-за отсутствия поставок импортных комплектующих с 2023 г. прекращен [15]. Однако отечественные ученые предлагают альтернативные варианты [16], которые машиностроители и эксплуатирующие РА-3 компании со временем смогут принять на вооружение, так как в будущем полигоны эксплуатации РА-3 (или их модификаций) неизбежно будут расширяться, в том числе и для постепенной замены выработавших ресурс более ранних серий — РА-2. С учетом экологических требований наиболее предпочтительным является вариант эксплуатации ЭС с накопителями, но этот вариант требует значительных

капитальных вложений и может рассматриваться в долгосрочной перспективе при выполнении технико-экономического обоснования для конкретных участков эксплуатации.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствие в наличном парке отечественных перевозчиков дизельного МВПС с максимальной скоростью выше 120 км/ч делает безальтернативным использование для скоростных межрегиональных экспрессов на маршрутах, включающих как электрифицированные, так и неэлектрифицированные участки, тягу скоростных электропоездов ЭС с помощью пассажирского тепловоза ТЭП70БС. Расчетные затраты на обеспечение системы микроклимата ЭС при этом могут превышать 80 кг/ч. Перспектива создания для данных маршрутов ЭС с возможностью автономного хода требует проведения технико-экономических расчетов с целью обоснования этого проекта.

2. Для межрегиональных экспрессов, в расписании которых заложена средняя скорость до 90 км/ч, использование ТЭП70БС для тяги ЭС по энергозатратам менее выгодно, чем использование дизель-поезда РА-3. Из существующих участков обслуживания возможно использование РА-3 в шестивагонном исполнении на маршрутах Волоколамск — Муравьево и Бологое — Валдай — Старая Русса. Экономия удельного расхода топлива на тягу по предварительной оценке может составить около 8 %, на отопление — в зависимости от погодных условий; для средних значений 9 месяцев 2023 г. — около 9%. Дополнительным резервом экономии при этом будет возможность оперативного изменения составности РА-3, отсутствующая у ЭС, которая позволит учесть неравномерность пассажиропотока во времени.

**Финансирование:** автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Руднев В. С., Маношин А. В. Как повысить эффективность дизельной тяги в пригородном сообщении // Локомотив. 2011. № 6 (654). С. 31–34 [Rudnev V. S., Manoshin A. V. How to improve diesel traction on suburban routes. *Lokomotiv*. 2011;(6):31-34. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/nyelyx>.

2. Аникиев И. П., Ляшенко А. С., Носков М. Ю. Будущее дизель-поездов в России // Локомотив. 2003. № 5. С. 21–22 [Anikiev I. P., Lyashenko A. S., Noskov M. Yu. Future diesel trains in Russia. *Lokomotiv*. 2003;(5):21-22. (In Russ.)].
3. Знакомьтесь: Тепловоз ТЭП70БС нового исполнения / С. И. Ким [и др.] // Локомотив. 2019. № 7 (751). С. 39–42 [Kim S. I., Pronin A. A., Aksenyuk A. A., Bychkov A. V. Please, meet: ТЕР70БС diesel locomotive of new configuration. *Lokomotiv*. 2019;(7):39-42. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/qbgzjc>.
4. Рудов П. К. Улучшение продольной динамики дизель-поезда ДДБ1 при торможении // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2007. № 1–2 (14–15). С. 129–132 [Rudov P. K. Improvement of DDBL diesel train longitudinal dynamics under braking. *Bulletin of BSUT: science and transport*. 2007;(1-2):129-132. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ydsdprj>.
5. Создан вагон-электростанция для обеспечения движения поездов на неэлектрифицированных участках железных дорог (новости Трансмашхолдинга) // Локомотив. 2022. № 5. С. 36 [Power station carriage created to support train traffic on non-electrified railway sections (Transmashholding news). *Lokomotiv*. 2022;(5):36. (In Russ.)].
6. Аникиев И. П., Корнев А. Н. Электрическое отопление пассажирских вагонов от тепловоза ТЭП70БС // Локомотив. 2008. № 10. С. 33–34 [Anikiev I. P., Kornev A. N. Electric heating of passenger cars from ТЕР70БС diesel locomotive. *Lokomotiv*. 2008;(10):33-34. (In Russ.)].
7. Коссов Е. Е., Азаренко В. А., Ляшенко А. С. Сравнение расходов топлива при включении генератора отопления на различных позициях контроллера машиниста // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1999. № 2. С. 21–24 [Kossov E. E., Azarenko V. A., Lyashenko A. S. Comparison of fuel consumption when switching on heating generator on different notches of driver's controller. *Russian Railway Science Journal*. 1999;(2):21-34. (In Russ.)].
8. Повышение эффективности использования мощности энергетической установки тепловоза с системой энергоснабжения поезда / А. С. Ляшенко [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2000. № 1. С. 25–27 [Lyashenko A. S., Kossov E. E., Kornev A. N., Azarenko V. A., Loginova E. Yu. Raising of operating efficiency of diesel locomotive power unit with system of train electric supply. *Russian Railway Science Journal*. 2000;(1):25-27. (In Russ.)].
9. Стоякин Г. М., Костин А. В., Науменко С. Н. Использование теплоты отработавших газов тепловозного двигателя для отопления пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 240–246 [Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. Use of diesel engine exhaust gas heat for heating passenger cars. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):240-246. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-240-246>.
10. Быстранов В. Е., Семёнов И. В., Железнов С. В. Перспективы применения контактно-аккумуляторных поездов в России // Локомотив. 2022. № 3 (783). С. 9–13 [Bystranov V. E., Semenov I. V., Zheleznov S. V. Prospects for the use of contact accumulator trains in Russia. *Lokomotiv*. 2022;(3):9-13. (In Russ.)].
11. Баранов А. М., Козлов В. Е., Фельдман Э. Д. Развитие пропускной и провозной способности однопутных линий. М.: Транспорт, 1964. 196 с. (Труды ВНИИЖТ; вып. 280) [Baranov A. M., Kozlov V. E., Feldman E. D. *Development of the throughput and carrying capacity of singletrack lines*. Moscow: Transport Publ.; 1964. 196 p. (Proceedings of the Railway Research Institute; Issue 280). (In Russ.)].
12. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Л. А. Мугинштейн [и др.]. М.: ВМГ-Принт, 2014. 144 с. [Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Vinogradov S. A., Popov K. M., Shkol'nikov E. N. *Modern methodology of technical regulation of the consumption of fuel and energy resources by locomotives for train traction*. Moscow: VMG-Print Publ.; 2014. 144 p. (In Russ.)].
13. Вольперт А. Г. Пригородные и региональные перевозки. Каким дизельным подвижным составом их выполнять // Железнодорожный транспорт. 1997. № 2. С. 39–43 [Volpert A. G. Diesel rolling stock for suburban and regional transport. *Zheleznodorozhnyy transport*. 1997;(2):39-43. (In Russ.)].
14. Вольперт А. Г. Повышение топливной экономичности автомотрис и дизель-поездов // Железнодорожный транспорт. 1999. № 11. С. 68–71 [Volpert A. G. Improvement of fuel efficiency of motorailers and diesel trains. *Zheleznodorozhnyy transport*. 1999;(11):68-71. (In Russ.)].
15. Статистика // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2023. № 4(64). С. 62–68 [Statistics. *Vestnik Instituta problem yestestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog*. 2023;(4):62-68. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/mvdzmnh>.
16. Руднев В. С. Отечественная силовая установка для рельсового автобуса // Локомотив. 2023. № 6(798). С. 33–36 [Rudnev V. S. Domestic power plant for rail buses. *Lokomotiv*. 2023;(6):33-36. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ubyyive>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Кирилл Михайлович ПОПОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НЦ «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 10), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Kirill M. POPOV,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 12.01.2024, первая рецензия получена 29.01.2024, вторая рецензия получена 02.02.2024, принята к публикации 07.02.2024.

The article was submitted 12.01.2024, first review received 29.01.2024, second review received 02.02.2024, accepted for publication 07.02.2024.