



Влияние составности поездов на характер воздействия факторов, влияющих на энергопотребление



Виктория ВИТОВСКАЯ



Алексей ДАВЫДОВ



Александр КОМЯКОВ

Виктория Витальевна Витовская¹, Алексей Игоревич Давыдов², Александр Анатольевич Комяков³

^{1, 2, 3} Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия.

¹ ORCID: 0009-0001-3232-286X; Web of Science Researcher ID: HSH-1681-2023; РИНЦ SPIN-код: 2483-1615; РИНЦ Author ID: 1191684.

² ORCID: 0000-0002-8842-2800; Web of Science Researcher ID: E-1446-2019; РИНЦ SPIN-код: 9039-4400; РИНЦ Author ID: 653459.

³ ORCID: 0000-0002-1960-3018; Web of Science Researcher ID: N-8824-2016; РИНЦ SPIN-код: 3775-1920; РИНЦ Author ID: 514132.

✉ ¹ vitovskaya.99@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время разработка технических и пооперационных норм удельного расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, эксплуатируемых на железных дорогах Российской Федерации и стран СНГ, ведется методами, разработанными еще в 60-е гг. XX века. Использование при расчете норм современных методов интеллектуального анализа данных предполагает предварительное исследование и выбор факторов, оказывающих значительное влияние на величину расхода топливно-энергетических ресурсов.

Настоящее исследование направлено на выявление различий в характере воздействия показателей использования локомотивов, таких как участковая и техническая скорость, масса состава, нагрузка на ось, на величину удельного расхода электроэнергии на тягу поездов для различных типов железнодорожного грузового подвижного состава. Особое внимание в статье уделяется определению характера влияния факторов на удельный расход электроэнергии контейнерных поездов.

В работе нашли применение метод статистической обработки данных Стьюдента, используемый для определения однородности исследуемых выборок, и метод корреляционного анализа Пирсона в части определения коэффициентов корреляции между

удельным расходом электроэнергии на тягу поездов и факторами, предположительно влияющими на величину этого расхода. Регрессионные модели, описывающие зависимость удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от рассматриваемых влияющих факторов, построены с использованием метода множественной линейной регрессии.

Статья содержит результаты проверки однородности исследуемых выборок удельного расхода электроэнергии в виде значений t-критерия Стьюдента, диаграммы рассеяния величины удельного расхода электроэнергии в зависимости от величины влияющих факторов, описание величин рассчитанных коэффициентов корреляции для каждой исследуемой группы грузовых поездов. Уделяется внимание возможным причинам различия в характере и степени воздействия факторов для разных типов грузового подвижного состава.

Проведенное исследование аргументирует необходимость разработки методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, позволяющей учесть влияние составности поездов с использованием современных методов анализа данных.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, анализ энергопотребления, нормирование энергопотребления, составность поездов, корреляционный анализ, контейнерные поезда.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания № 109-00004-24-02 (научная тема ЕКТУ-2023-0003) по теме «Разработка концептуальной модели системы поддержки принятия решений в области анализа и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов».

Для цитирования: Витовская В. В., Давыдов А. И., Комяков А. А. Влияние составности поездов на характер воздействия факторов, влияющих на энергопотребление // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-10>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время процесс анализа, планирования и нормирования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на тягу поездов на железных дорогах Российской Федерации и стран СНГ регламентируется различными нормативными документами в области планирования, нормирования, анализа и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов¹.

В рамках выделенных лимитов финансирования с учетом планового объема перевозочной работы на предприятии определяется планируемый объем потребления ТЭР на тягу поездов. Далее рассчитываются соответствующие объемы на различных уровнях организационной структуры железнодорожной отрасли. В качестве основного показателя энергоемкости перевозочного процесса на уровне поездки используется удельный расход ТЭР – отношение объема энергопотребления к объему работы, выраженной в соответствующих единицах.

В целях мотивации причастных подразделений к выполнению плановых объемов расхода ТЭР устанавливаются нормы удельного расхода ТЭР на тягу поездов – по видам ресурсов (электроэнергия, дизельное топливо, газ, мазут, уголь); по уровню нормирования (технические, пооперационные для локомотивных бригад, групповые для уровня структурных подразделений и выше); по видам тяги; по видам движения и выполняемой работы; по участкам работы и по периодам нормирования.

Важнейшим направлением для анализа энергетической эффективности перевозочного процесса является установление технических и пооперационных норм для поездок локомотивных бригад. Технические нормы удельного расхода ТЭР разрабатываются на основе режимных карт в зависимости от серии подвижного состава для каждого участка работы, в зависимости от профиля с градацией по массе поезда, а также нагрузке на ось или составности поезда. Основой для определения

технических норм являются опытные поездки тягово-энергетических лабораторий, данные энергооптимальных режимов вождения поездов (с помощью автоматизированных систем построения энергооптимальных графиков движения поездов), а также тяговые расчеты, выполняемые как в ручном режиме, так и с применением современных программных средств. Пооперационные нормы удельного расхода ТЭР разрабатываются для учета условий поездки, отличающихся от среднестатистических, заложенных в техническую норму. Пооперационные нормы учитывают энергопотребление на отдельные технологические операции, такие как простой подвижного состава в рабочем состоянии, нагон опоздания пассажирских и грузовых поездов для вхождения в расписание, прогрев вагонов моторвагонного подвижного состава в пунктах отстоя, выполнение предупреждений об ограничении скорости, остановки у запрещающих сигналов, неграфиковые остановки, опробование тормозов поезда в пути следования после длительной стоянки, не предусмотренной графиком движения поездов, и т.д.

В связи со значительной сложностью выполнения поездок с привлечением тягово-энергетической лаборатории и применения программных комплексов для выполнения тяговых расчетов, на практике машинистами-инструкторами по теплотехнической работе широко применяется статистический метод определения технических норм удельного расхода ТЭР. При этом из генеральной совокупности поездок каждой серии ТПС, в соответствующем виде движения, с поездами соответствующей массы (или с соответствующей нагрузкой на ось вагона) по конкретному поездоучастку отбираются те, которые, по мнению машиниста-инструктора, являются образцовыми и выполнены в среднестатистических условиях. Среднее значение удельного расхода ТЭР по указанным выборкам определяется с учетом коэффициентов учета сезонности, погодных условий, применения оптимальных методов ведения поезда (определяемых на основе метода экспертных оценок) и считается удельной нормой, которая может быть скорректирована при отклонении от учитываемых условий выполнения поездок. Таким образом, значение рассчитанной удельной нормы энергопотребления на тягу поездов содержит в себе существенную долю субъективизма, а выбранные поездки могут

¹ См. напр: СТП БЧ 17.217–2012 Расчет норм расхода дизельного топлива на тягу поездов для подразделений локомотивного хозяйства Белорусской железной дороги. – Минск: Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, 2012. – 23 с; Положение о планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД». Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 17 мая 2019 г. № 962/р.



не до конца учитывать потенциал методов энергоэффективного ведения поезда и содержать в себе ошибки нормирования предыдущих временных периодов. Кроме того, при модернизации системы анализа и нормирования энергопотребления на тягу поездов необходимо учесть возможности современных вычислительных средств, а также методы интеллектуального анализа данных.

Целью работы было исследование различий в характере влияния факторов на величину удельного расхода электроэнергии (УРЭ) для наиболее широко эксплуатируемых на железных дорогах России и стран СНГ типов грузовых поездов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определению и изучению факторов, влияющих на энергопотребление поезда, посвящено множество зарубежных [1–8] и отечественных исследований [9–15].

Традиционно исследуется воздействие на величину удельного расхода электроэнергии $w_{уд}$ следующих показателей использования локомотивов: участковой скорости $V_{уч}$, технической скорости V_{tex} , массы состава m_c , нагрузки на ось q . С целью определения характера воздействия на величину УРЭ перечисленных факторов проводится анализ данных о более чем 9000 поездках электропоездов, произведенных локомотивными бригадами одного из эксплуатационных локомотивных депо Западно-Сибирской железной дороги за период с октября 2022 по апрель 2023 гг. Основным источником информации о величинах влияющих факторов являются данные системы централизованной обработки маршрута машиниста (ЦОММ). С использованием табличного процессора Microsoft Excel и языка программирования Visual Basic for Applications производится расчет величины ряда факторов, информация о которых содержится в отчетных формах в неявном виде (УРЭ, масса состава, нагрузка на ось).

Исследование характера влияния факторов ведется для 5 групп поездов: общей совокупности всех типов грузовых поездов (1 группа), сквозных поездов (2 группа), сквозных поездов массой больше 5500 т (3 группа) и меньше 5500 т (4 группа) и контейнерных поездов (5 группа). Такое деление обусловлено наличием ряда отличительных признаков в организации перевозочного процесса для подвижного состава, представляющего

каждую группу. Например, сквозные поезда массой больше 5500 т часто являются составами с наливными грузами, составами с высоким коэффициентом использования грузоподъемности вагона. В свою очередь контейнерные поезда имеют следующие отличительные особенности: низкая величина нагрузки на ось вагона, относительно малая масса составов, использование особого вида подвижного состава – платформ – для перевозки контейнеров. Сквозные поезда массой меньше 5500 т выделяются в отдельную группу по причине наличия сходных признаков с контейнерными поездами – малая масса и нагрузка на ось. Совокупность данных, представляющих группу 1, является генеральной выборкой в данном исследовании. Выборка второй группы содержит данные о поездках всех сквозных поездов, исключая данные о поездках контейнерных поездов.

Для проверки наличия зависимости характера воздействия факторов от типа подвижного состава, исследуем однородность выборок по УРЭ групп 2 и 5 и групп 4 и 5 поездов методом t -критерия Стьюдента [16]. Применение традиционного метода статистического анализа допустимо, так как выборки независимы друг от друга, а число наблюдений в выборках большое [17].

Перед проведением корреляционного анализа были построены диаграммы рассеяния $w_{уд}$ в зависимости от величины исследуемых влияющих факторов.

Определение степени влияния и характера воздействия факторов проводится методом корреляционного анализа Пирсона, включающим расчет коэффициентов корреляции r и построение корреляционных матриц.

Расчет коэффициента корреляции ведется по выражению:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x \cdot S_y \cdot (n-1)}, \quad (1)$$

где x_i, y_i – значения случайных величин;
 \bar{x}, \bar{y} – средние значения случайных величин;

n – объем выборки;

S_x, S_y – средние квадратические отклонения случайных величин.

Оценка силы корреляционной связи осуществляется в соответствии со шкалой Чеддока.

Построение регрессионных моделей для УРЭ по четырем исследуемым факторам ве-

Таблица 1

Эмпирические значения t -критерия для исследуемых выборок [получено авторами]

Период	Исследуемые выборки			
	группы 2 и 5		группы 4 и 5	
	нечетное направление	четное направление	нечетное направление	четное направление
Январь	-7,89	-8,69	1,12	-3,89
Февраль	-5,13	-3,06	1,23	0,08
Март	-5,92	-2,6	-0,73	0,13
Апрель	-5,76	-3,54	-0,09	-0,55
Октябрь	-4,1	-7,76	3,01	-3,46
Ноябрь	-3,76	-4,28	4,88	-1,05
Декабрь	-4,83	-5,46	4,15	-1,07
7 месяцев	-13,78	-13,08	5,25	-3,65

дется методом множественной линейной регрессии. В работе выполняется построение двух регрессионных моделей. Первая модель реализуется на основе данных генеральной совокупности, вторая – по данным о поездках только контейнерных поездов. Выборки делятся на две части: данные о 80 % поездок используются непосредственно при построении модели, остальные 20 % (тестовая выборка) – при оценке точности модели. Общий вид, получаемых уравнений регрессии описывается выражением:

$$w_{уд} = \Delta_0 + \Delta_1 V_{уч} + \Delta_2 V_{max} + \Delta_3 m_c + \Delta_4 q, \quad (2)$$

где Δ_j – j -е коэффициенты уравнения регрессии.

Точность моделей проверяется на значениях УРЭ контейнерных поездов из тестовой выборки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам статистического анализа Стьюдента составлена табл. 1, в которой отражены эмпирические $t_{эмп}$ значения t -критерия для исследуемых выборок. Критическое значение критерия $t_{крит}$ на уровне значимости 0,05, определенное по статистической таблице [18], равно 1,96 для всех исследуемых выборок, так как число степеней свободы в них превышает значение 120.

Согласно данным табл. 1, все исследуемые выборки УРЭ групп 2 и 5 оказались неоднородными. При сравнении с выборками УРЭ групп 4 и 5 выборки являются однородными в 9 из 16 случаев. Наличие неоднородности сравниваемых выборок позволяет сделать вывод о различиях в характере воздействия на величину УРЭ влияющих факторов (массы состава, нагрузки на ось, скорости движения поезда и т.д.) для исследуемых типов грузовых поездов. Причем неоднородность с выборками поез-

дов группы 4 может означать, что причиной отличий в характере воздействия влияющих факторов на контейнерные поезда по сравнению с другими является не только их относительно небольшая масса.

Перед проведением корреляционного анализа были исследованы диаграммы рассеяния величины УРЭ в зависимости от величины влияющих факторов. В качестве примера на рис. 1 приведены диаграммы рассеяния для поездок, произведенных в апреле 2023 года для исследуемой группы 1. Диаграммы имеют схожий вид для всех исследуемых групп поездов.

Визуальный анализ диаграмм рассеяния позволяет предположить слабую и очень слабую корреляционную связь между $w_{уд}$ и $V_{уч}$ (рис. 1а), между $w_{уд}$ и $V_{тех}$ (рис. 1б) средней и сильную связь $w_{уд}$ с m_c (рис. 1в) и $w_{уд}$ с q (рис. 1г)

Рассмотрим результаты исследования корреляционных связей между $w_{уд}$ и участковой $V_{уч}$ и технической $V_{тех}$ скоростями, массой состава m_c и нагрузкой на ось q .

Участковая скорость $V_{уч}$ представляет собой среднее значение скорости поезда с учетом времени остановок, времени на замедления и разгоны. Техническая скорость $V_{тех}$ в отличие от участковой не учитывает время стоянок. В зависимости от выбранного режима ведения поезда увеличение средней скорости движения может приводить как к возрастанию, так и к уменьшению УРЭ [19]. Анализ показал, что корреляционная связь между УРЭ и участковой $V_{уч}$ и технической скоростью $V_{тех}$ характеризуется как слабая. Коэффициент корреляции с участковой скоростью $r_{V_{уч}}$ изменяется в диапазоне от –0,17 до 0,09, коэффициент корреляции с технической скоростью $r_{V_{тех}}$ – в диапазоне от –0,12 до 0,11. Наибольшие



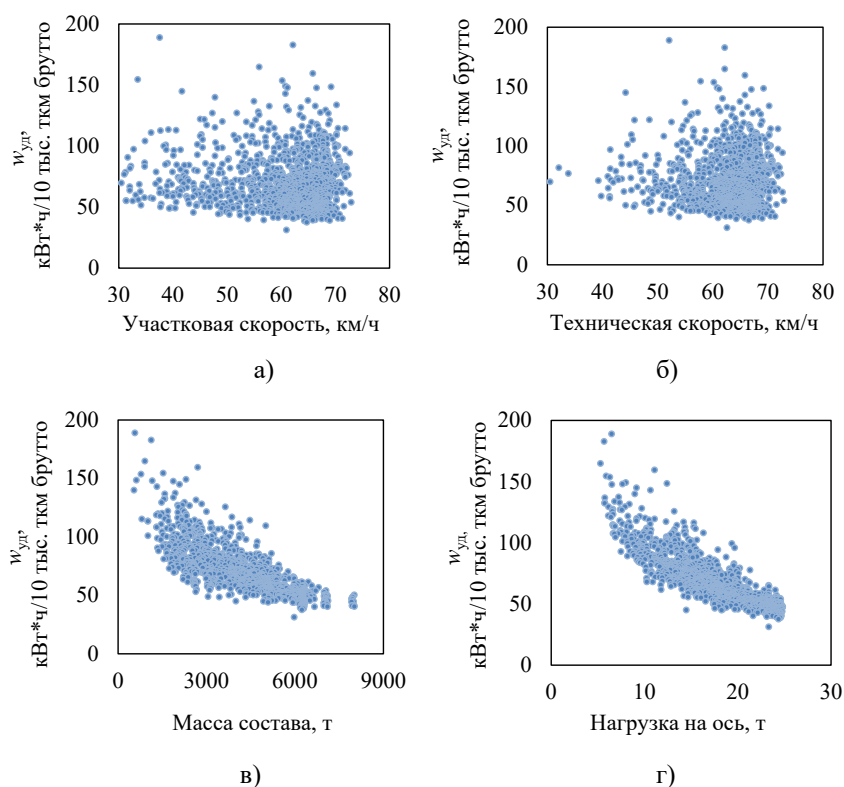


Рис. 1. Диаграммы рассеяния значений $w_{уд}$ в зависимости от величины:
а) – участковой скорости $V_{уч}$, б) – технической скорости $V_{тех}$,
в) – массы состава m_c , г) – нагрузки на ось q [получено авторами].

по модулю отрицательные коэффициенты корреляции характерны для поездов группы 3, а наибольшие положительные – для поездов групп 4 и 5.

Отмечается отрицательный характер влияния на УРЭ участковой и технической скорости для поездов группы 3, который может быть связан со значительными энергетическими затратами на разгон поездов массой больше 5500 т после остановки. Существование статистически значимых положительных коэффициентов корреляции для скоростей контейнерных поездов и поездов массой меньше 5500 т связано с тем, что поезда наименьшей массы в этих группах, имеющие, как правило, больший удельный расход, имеют и наибольшую скорость.

Корреляционная связь между УРЭ и массой состава, согласно диаграмме рассеяния на рис. 1в, должна характеризоваться как сильная или очень сильная. Проведенный корреляционный анализ дал следующие результаты:

- коэффициент корреляции УРЭ с массой состава r_m имеет отрицательные значения

для всех исследуемых групп поездов в каждый период времени;

- модуль коэффициента корреляции r_m имеет наибольшие значения для групп 1 и 4 и изменяется в диапазоне от 0,91 до 0,67 с преобладанием сильной корреляционной связи;

- наименьшими значениями модуля коэффициента корреляции, в диапазоне от 0,60 до 0,21 с преобладанием средней корреляционной связи, характеризуются поезда групп 3 и 5, при том, что средние массы этих групп отличаются более чем в два раза.

На рис. 2 приведен график зависимости УРЭ от m_c для поездов за октябрь. Меньшие значения r_m для поездов группы 3 могут быть обусловлены тем, что для электровоза при больших массах состава создаются условия работы в режиме, близком к номинальному, где токовые нагрузки имеют оптимальные значения. Дальнейшее увеличение массы состава будет приводить к увеличению УРЭ [20].

Диапазону значений оптимальных по величине УРЭ масс соответствует горизонталь-

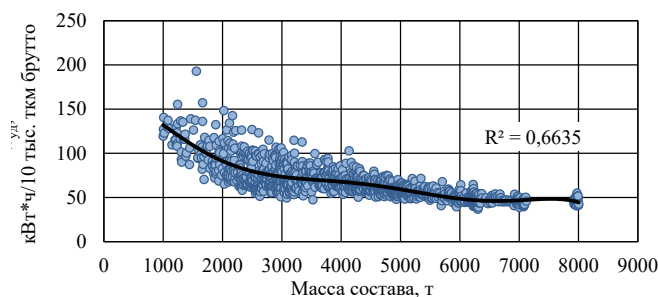
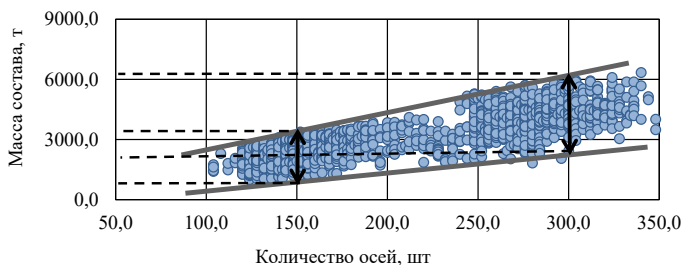
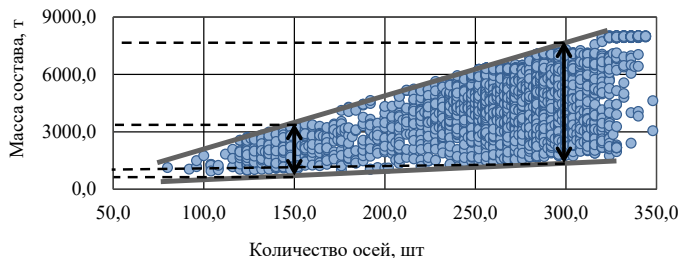


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электроэнергии от массы состава [получено авторами].



а



б

Рис. 3. Диапазон масс на количество осей для: а – контейнерных поездов, б – грузовых поездов [получено авторами]

ный участок аппроксимирующей кривой. Кривая, пройдя точку минимума, начнет возрастать. Однако это не нашло отражения на рис. 2, так как отсутствуют данные о работе составов массой более 9000 т на исследуемом участке.

Для выяснения причины более слабого характера влияния изменения m_c на УРЭ для контейнерных поездов были построены диаграммы рассеяния масс составов в зависимости от количества осей для контейнерных поездов (рис. 3а) и совокупности остальных групп грузовых поездов (рис. 3б).

Исходя из диапазона изменения масс для каждого количества осей на рис. 3а, увеличение массы контейнерных поездов производится в основном за счет увеличения количества осей. Изменение массы у остальных грузовых поездов производится в большей степени, чем у контейнерных поездов, за счет увеличения нагрузки на ось. Этим может объ-

ясняться более слабый характер влияния увеличения m_c на снижение УРЭ для контейнерных поездов.

Увеличение m_c за счет добавления осей приводит к большему возрастанию сопротивления движению поезда, чем за счет повышения q , так как некоторые составляющие основного сопротивления движению поезда не зависят от q , например, воздушное сопротивление.

Корреляционный анализ взаимосвязи величины УРЭ и нагрузки на ось вагона q имеет следующие результаты:

- коэффициент корреляции УРЭ с нагрузкой на ось r_q как и r_m имеет отрицательные значения для всех исследуемых выборок;
- модуль коэффициента корреляции r_q имеет наибольшие значения для тех же групп поездов, что и модуль r_m и изменяется в диапазоне от 0,83 до 0,91;



Таблица 2

Результаты построения и проверки регрессионных моделей [получены авторами]

	Δ_j -коэффициент	p-значение	R^2	δ , %
Модель 1(на основе данных о всех поездках)				
Δ_0	133,223		0,81	10,77
$V_{уч}$	-0,102	0,018		
$V_{тех}$	0,179	0,001		
m_c	-0,003	0		
q	-3,192	0		
Модель 2 (на основе данных о поездках контейнерных поездов)				
Δ_0	146,793		0,65	9,92
$V_{уч}$	-0,097	0,251		
$V_{тех}$	0,165	0,108		
m_c	-0,006	0		
q	-3,579	0		

– наименьшими значениями модуля коэффициента корреляции, в диапазоне от 0,44 до 0,78 с преобладанием средней корреляционной связи, характеризуются поездками групп 4 и 5;

– модули r_q для контейнерных поездов имеют значения в среднем в 1,4 раза больше, чем модули r_m , для остальных групп поездов – в среднем в 1,2 раза.

Результаты построения регрессионных моделей представлены в табл. 2, в которой сведены значения Δ коэффициентов регрессии, коэффициентов детерминации R^2 , p -значения, а также средние значения относительных погрешностей моделей δ .

Применение модели 1 для расчета $w_{уд}$ контейнерных поездов дало среднее значение относительной погрешности 10,77 %, при том, что в генеральной совокупности поездки контейнерных поездов составляют 25,9 %.

Исходя из значения R^2 , полученного для модели 2, только 65 % дисперсии $w_{уд}$ можно объяснить рассматриваемыми факторами. Исключение переменных $V_{уч}$ и $V_{тех}$ не повышает значение R^2 , однако стандартная ошибка регрессии снижается с 3,41 до 1,29. Для повышения точности второй модели необходимо учесть и другие влияющие факторы, например, погодные условия.

Предварительный регрессионный анализ, с учетом дополнительных факторов показал, что возможно снижение δ до 4,87 % для модели 2 и до 9,31 % для модели 1. Вторая модель имеет больший потенциал к повышению точности при включении в нее факторов погодных условий, что является предметом

дальнейших исследований. С целью подтверждения наличия зависимости между характером влияния факторов на величину удельного расхода энергоресурсов и составностью поездов, требуется проведение аналогичных исследований для других поездоучастков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемые в настоящее время на железных дорогах Российской Федерации и стран СНГ подходы к анализу, планированию и нормированию ТЭР не позволяют производить расчет прогнозных значений потребления ТЭР на тягу с учетом составности поездов.

В статье были проанализированы данные о поездках, совершенных на территории Российской Федерации в границах Западно-Сибирской железной дороги. Проверка данных удельного расхода электроэнергии методом Стьюдента для различных типов грузовых поездов показала наличие неоднородности исследуемых выборок. Проведенный корреляционный анализ Пирсона позволил описать характер и степень воздействия влияющих факторов на удельный расход электроэнергии исследуемых типов грузовых поездов. Отмечаются существенные различия во влиянии величины массы состава и осевой нагрузки на удельный расход электроэнергии для контейнерных поездов и поездов массой больше 5500 т.

Выделение поездов по характерным признакам в отдельные группы позволяет производить индивидуальный подбор влияющих

факторов, оказывающих значимое воздействие на энергопотребление. Это дает возможность повысить точность моделей прогнозирования значений удельного расхода энергоресурсов для каждого типа поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ren Junhua, Zhang Qing, Liu Feng. Analysis of factors affecting traction energy consumption of electric multiple unit trains based on data mining. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 262, 121374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121374>.
2. Fischer, S. Traction energy consumption of electric locomotives and electric multiple units at speed restrictions. *Acta Technica Jaurinensis*, 2015, Vol. 8, Iss. 3, pp. 240–256. DOI: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v8.n3.3>.
3. Kampczyk, A., Gamon, W., Gawlak, K. Integration of Traction Electricity Consumption Determinants with Route Geometry and Vehicle Characteristics. *Energies*, 2023, Vol. 16, 2689. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062689>.
4. Pan Deng, Chen Zejun, Mei Meng. Energy efficiency emergence of high-speed train operation and systematic solutions for energy efficiency improvement. *SN Applied Sciences*, 2020, Vol. 2, article number 875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2692-5>.
5. Lukaszewicz, P. Running resistance—results and analysis of full-scale tests with passenger and freight trains in Sweden. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2007, Vol. 221, Iss. 2, pp. 183–193. DOI: [10.1243/0954409JRR89](https://doi.org/10.1243/0954409JRR89).
6. Рожков А. В., Суюнбаев Ш. М., Салфетников В. В., Балабаев О. Т., Нартов М. А. Определение дополнительного сопротивления движению поезда от элементов профиля железнодорожных подъездных путей промышленных предприятий // *Труды университета*. – 2022. – № 2 (87). – С. 211–216. DOI: [10.52209/1609-1825_2022_2_211](https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_2_211).
7. Boschetti, G., Mariscotti, A. The Parameters of Motion Mechanical Equations as a Source of Uncertainty for Traction Systems Simulation. *XX IMEKO World Congress*, 2012, Busan, South Korea. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/265843501_The_parameters_of_motion_mechanical_equations_as_a_source_of_uncertainty_for_traction_systems_simulation. Доступ 19.01.2024.
8. Rochard, B., Schmid, F. A review of methods to measure and calculate train resistances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2000, Vol. 214, Iss. 4, pp. 185–199. DOI: [10.1243/0954409001531306](https://doi.org/10.1243/0954409001531306).
9. Сидорова Н. Н. Определение энергозатрат на неплановые остановки // *Мир транспорта*. – 2013. – Т. 11. – № 4 (48). – С. 48–51. EDN: PZREOZ.
10. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Саркенов С. С. Влияние тяговой нагрузки на электропотребление в системе тягового электроснабжения на участках с горным профилем пути // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2019. – № 1 (73). – С. 112–118. EDN: ZBKLRP.
11. Медлин Р. Я., Сидорова Е. А. Нормирование расхода энергоресурсов // *Электрическая и тепловозная тяга*. – 1989. – № 2. – С. 4.
12. Бакланов А. А., Доманов К. И., Есин Н. В. [и др.] Классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии электроподвижным составом // *Инновационный транспорт*. – 2020. – № 4 (38). – С. 61–66. DOI: [10.20291/2311-164X-2020-4-61-66](https://doi.org/10.20291/2311-164X-2020-4-61-66).
13. Шкурин К. М. Исследование влияния массы грузовых поездов на их участковую скорость // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт*. – 2018. – № 1 (36). – С. 70–72. EDN: YWINYD.
14. Исаев И. П., Сидорова Н. Н., Феоктистов В. П. Нормирование расхода энергии в грузовом движении на основе статистических методов // *Железнодорожный транспорт. Серия: Локомотивы и локомотивное хозяйство*. – 1988. – Вып. 5. – С. 1–15.
15. Сидорова Н. Н. Анализ энергоемкости перевозочного процесса в электрической тяге на основе многофакторной модели. // *Вестник МИИТ. Научно-технический журнал*. – 2000. – Вып. 5. – С. 23–27.
16. Гмурман В. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1977. – 429 с.
17. Орлов А. И. Проверка статистической гипотезы однородности математических ожиданий двух независимых выборок: критерий Крамера-Уэлча вместо критерия Стьюдента // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 110 (06). – С. 197–218. [Электронный ресурс]: https://orlovs.pp.ru/work/901-1000/954_%20Критерий%20Крамера-Уэлча.pdf. Доступ 19.01.2024.
18. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 464 с.
19. Бакланов А. А. Влияние скорости движения на энергозатраты грузовых поездов // *Известия Транссиба*. – 2018. – № 1 (33). – С. 2–12. EDN: XQXUWT.
20. Вильгельм А. С., Иванченко В. И., Комяков А. А., Штраухман А. А. Определение оптимальных значений эксплуатационных показателей электроподвижного состава по критерию энергоэффективности // *Известия Транссиба*. – 2021. – № 4 (48). – С. 85–96. [Электронный ресурс]: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2021-4\(48\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2021-4(48).pdf) [полный текст выпуска]. Доступ 19.01.2024. ●

Информация об авторах:

Витовская Виктория Витальевна – аспирантка кафедры теоретической электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, vitolvskaia.99@mail.ru.

Давыдов Алексей Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и компьютерной графики Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, davydovai@bk.ru.

Комяков Александр Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, tskot@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.01.2024, одобрена после рецензирования 26.03.2024, принята к публикации 30.03.2024.

