

УДК 629.1

## Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка — Верхний Баскунчак с целью выявления ветровых нагрузок

И. А. Гребнев, Н. Н. Сидорова, О. Е. Пудовиков

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

**Для цитирования:** Гребнев И. А., Сидорова Н. Н., Пудовиков О. Е. Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка — Верхний Баскунчак с целью выявления ветровых нагрузок // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 550–557. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-550-557

### Аннотация

**Цель:** Данная статья посвящена важным проблемам энергосбережения. Актуальность статьи особенно велика для степных районов нашей страны, где большую часть года преобладают ветра большой скорости, которые оказывают влияние на увеличение расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на тягу поездов. Данный вопрос открыт, и никаких методик анализа не разработано. А в локомотивных депо нет четкого нормирования энергозатрат на тягу поездов при воздействии дополнительного сопротивления движению. **Методы:** В статье показана высокая значимость данной проблемы для Российских железных дорог (ОАО «РЖД»), были проанализированы основные факторы, влияющие на расход топлива и электроэнергии, и основные методы нормирования ТЭР, которые применяются в нашей стране. Для рассмотрения был выбран участок Палласовка — Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги в тяге с тепловозами серии 2ТЭ25КМ. На основе выборок из данных маршрутов машинистов были построены и проанализированы гистограммы удельного расхода топлива для поездов с фиксированной минимальной и максимальной нагрузкой на ось. **Результаты:** На основе данных числовых характеристик полученных выборок были сделаны выводы о влиянии ветровых нагрузок на удельный расход топлива. Наличие ветра существенно повышает энергозатраты на тягу поездов. Влияние ветровых нагрузок сильнее на порожние поезда. **Практическая значимость:** Показана необходимость уточнения норм расхода топлива. Их корректировка позволит повысить точность определения, учета затрат энергоресурсов при их нормировании в локомотивных депо. Предложенные корректировки могут быть рекомендованы к практическому использованию на рассматриваемом участке.

**Ключевые слова:** ТЭР, энергосбережение, энергоэффективность, удельный расход топлива, ветровые нагрузки.

## Введение

Железнодорожный комплекс — один из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в стране. Что касается дизельного топлива, то затраты на него в общей структуре затрат ОАО «РЖД» весьма значимы и составляют 8 % от всех трат компании.

Экономия дизельного топлива является основной топливно-энергетической политики ОАО «РЖД». Повысить энергоэффективность железнодорожного транспорта можно, задействовав технические или организационные мероприятия. Как правило, организационные мероприятия требуют наименьших инвестиций, применимы конкретно к рассматриваемым локомотивным депо и сводятся к нахождению, выявлению и снижению основных факторов, влияющих на расход топлива [1].

Факторы, которые влияют на затраты топлива при движении поездов на каждом плече, подразделяются на 3 основные категории:

– постоянные, имеющие незначительные изменения за долгое время эксплуатации, которыми можем пренебречь, например профиль железнодорожного пути;

– условно постоянные, которые неизменны за продолжительный период времени (например, типы тягового подвижного состава и вагонов) или имеют достаточную устойчивость в конкретные месяцы года (например, определенные потоки грузовых поездов или сезонная температура окружающей среды);

– переменные, изменяющиеся в каждой конкретной поездке (к примеру, все характеристики грузовых составов) [2].

К последней части относят и такие факторы, которые меняются в функции времени в процессе выполнения поездки и которые надо в ряде случаев учитывать, к примеру температура, скорость и направление ветра. Переменным фактором служит реализуемая зависимость скорости по пути в каждой поездке. Затраты дизельного топлива за

поездку во многом зависят и от степени профессионализма машинистов.

Нормирование расхода топлива на тягу поездов имеет серьезное значение для организации эффективной работы железнодорожного транспорта. На данный момент известны 3 основных метода технического нормирования:

1. Техническое нормирование на основе аналитических расчетов расхода ТЭР на тягу поездов.

2. Нормирование на основе автоматизации обработки данных маршрутов машиниста.

3. Определение расхода ТЭР за поездку на основе энергооптимального тягового расчета [3, 4].

## Обработка маршрутов машинистов

На основе данных маршрутов из локомотивного депо ТЧЭ-13 Ершов Приволжской ж. д., работающих на участке Палласовка — Верхний Баскунчак машинистов проводился анализ расхода топлива. Данные были взяты с таким условием, чтобы исключить или пренебречь влиянием на удельный расход температуры атмосферного воздуха. Были взяты данные с марта по май 2021 г. и с октября по декабрь 2020 г. [5]. Средняя температура в этих месяцах примерно одинаковая и варьируется от  $-10$  до  $10$  °С. То есть исключено влияние высоких и низких температур. Был произведен статистический анализ поездопотока, и были представлены гистограммы плотности распределения удельного расхода.

Также данный ресурс учитывает ветровые воздействия за поездку на основе данных метеостанции и рапорта машиниста. Это можно увидеть в специальной графе «Замечания».

При выборке маршрутов машинистов из исходной совокупности исключались те из них, которые имеют явно искаженные данные фактического расхода топлива. Для выбраковки статистических данных был использован критерий Граббса [6].

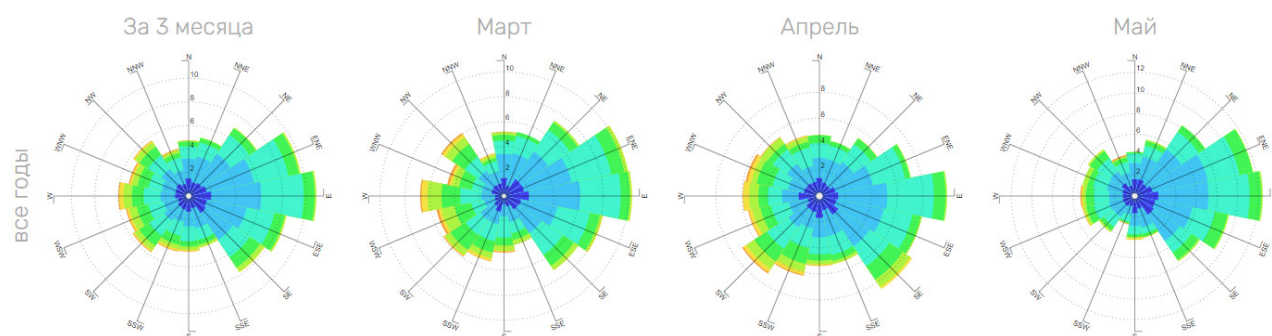


Рис. 1. Роза ветров метеостанции Эльтон

Для рассмотрения был выбран участок Палласовка — Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги. Участок был выбран исходя из рельефа местности, погодных и климатических условий. И из-за того, что в локомотивном депо «Ершов», обслуживающем данный участок, устанавливается дополнительная корректировка нормы расхода топлива исходя из походных условий. Участок находится полностью на равнинной степной, местности, переходящей в полупустынную. Следовательно, никакие воздушные потоки, кроме ветровых, здесь не будут оказывать существенного влияния [7]. Роза ветров метеостанции Эльтон, расположенной на данном участке, представлена на рис. 1.

### Числовые характеристики рассматриваемых выборок

На основе данных маршрутных листов была построена диаграмма плотности распределения нагрузки на ось в данном направлении [8]. Так как оба направления имеют практически одинаковые распределения с незначительной степенью отклонения, на рис. 1 представлена обобщенная гистограмма распределения нагрузки на ось.

Из диаграммы на рис. 2 можно сделать вывод, что преобладающее количество поездов являются полностью порожними с минимальной усредненной нагрузкой на ось либо полностью гружеными с максимальной нагрузкой. Нагрузка на ось является основным нормообразующим

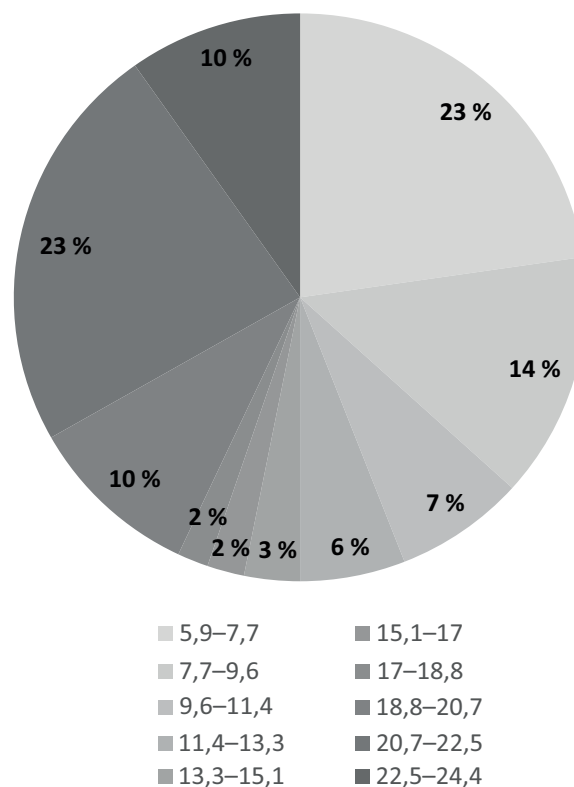


Рис. 2. Диаграмма плотности распределения нагрузки на ось грузовых поездов на рассматриваемом участке

фактором, от которого зависит удельный расход топлива. Поэтому при определении дополнительных факторов, влияющих на расход, принято считать нагрузку на ось постоянной. Была составлена частная выборка маршрутов со значениями нагрузки на ось, имеющими наибольший процент сектора в диаграмме. Числовые характеристики выборок представлены в табл. 1–4.

ТАБЛИЦА 1. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т без ветра для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива $e$ кг·ч/изм	104	28,3	5,4	14,8	46

ТАБЛИЦА 2. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т с ветром для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива $e$ кг·ч/изм	132	30	7,1	14,8	55,6

ТАБЛИЦА 3. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 6000 т без ветра для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива $e$ кг·ч/изм	113	15,02	1,88	11,2	19,7

ТАБЛИЦА 4. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 6000 т с ветром для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива $e$ кг·ч/изм	138	15,5	2,3	11,2	22,9

### Гистограммы плотности распределения удельного расхода топлива

Руководствуясь профилем пути, выборки данных из разных направлений были объединены. Проверка на однородность искомым выборкам проводилась на основе метода  $t$ -критерия Стьюдента [9, 10]. Далее на рис. 3, 4 были подготовлены гистограммы плотности распределения удельного расхода топлива для поездов с фиксированной минимальной и максимальной нагрузкой на ось.

Статистический анализ удельного расхода топлива показал, что лучше всего он описывается

логарифмически нормальным законом распределения. Этот вид распределения является устойчивым при любом характере поездопотока: с преобладанием и порожних, и груженых составов. Это связано с тем, что удельный расход не всегда линейно изменяется в зависимости от изменения нормообразующих факторов [11].

Для груженых поездов получились меньшие средние, максимальные и минимальные значения удельного расхода топлива, как в выборках без наличия ветровой нагрузки, так и с наличием: 15,02; 19,7; 11,2 и 28,27; 46; 14,8 (кг/10<sup>4</sup>·т·км брутто)

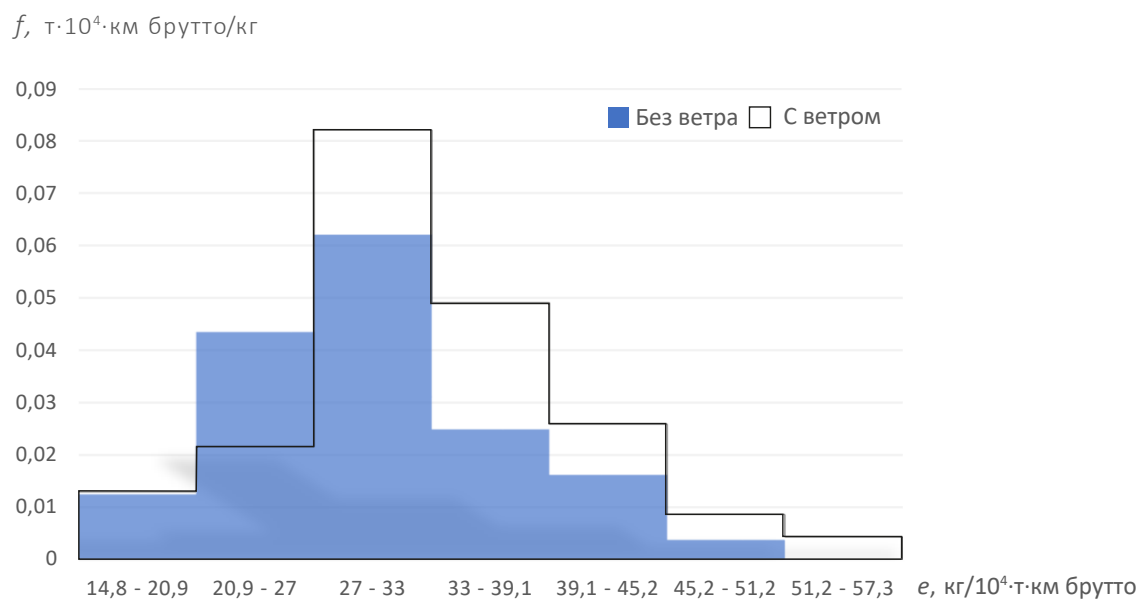


Рис. 3. Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ для общей выборки и для фиксированной минимальной нагрузки на ось

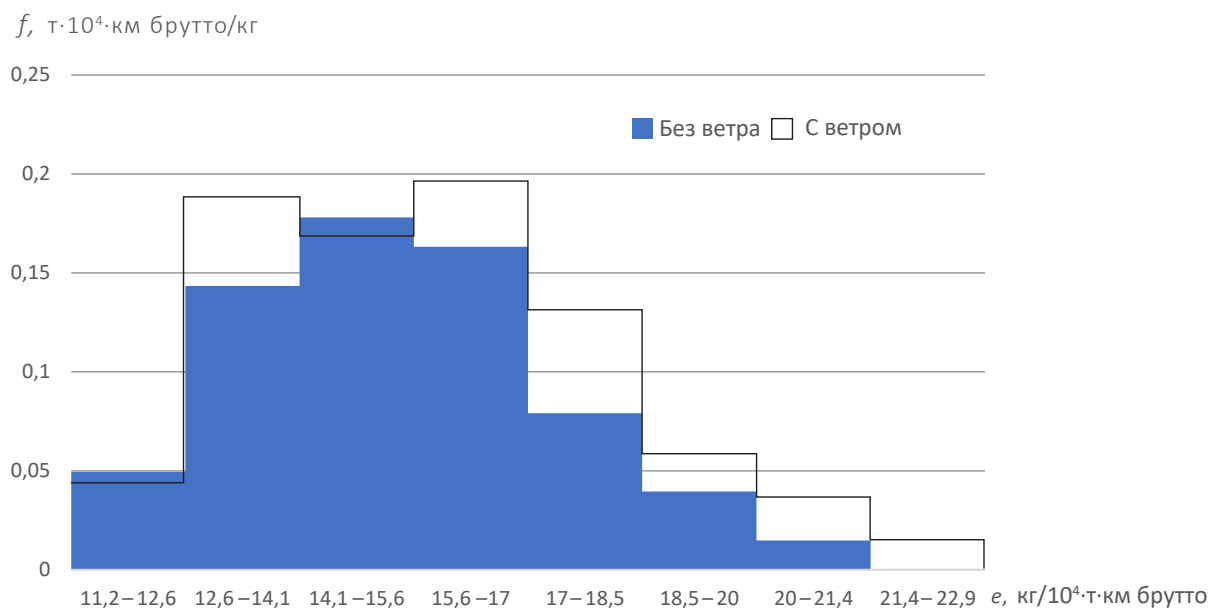


Рис. 4. Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ с ветром для общей выборки и для фиксированной максимальной нагрузки на ось

соответственно для выборок без влияния ветровых нагрузок, и 15,53; 22,9; 11,2 и 30,05; 55,6; 14,8 (кг/10<sup>4</sup>·т·км брутто) соответственно для выборок с влиянием ветровых нагрузок.

#### Анализ полученных гистограмм

В полученных гистограммах четко прослеживается увеличение величины удельного расхода топлива при наличии ветровых нагрузок. Это

заметно как в частных выборках, так и в общих выборках. Для порожних поездов среднее значение удельного расхода топлива увеличилось на 6,3 %. Медиана выборки с наличием ветровых нагрузок сместилась на 3,4 % в сторону увеличения. Также заметно увеличение асимметрии из-за наличия у выборки «хвостика», смещенного в сторону увеличения удельного расхода топлива. Получена большая разница в значениях дисперсии. Причем дисперсия для выборки с присутствием ветровых нагрузок значительно выше, чем у выборки без ветровых нагрузок. Вполне возможен такой разброс значений дисперсий из-за разного направления ветровых нагрузок. Это еще раз может доказывать, что присутствие ветровых нагрузок значительно изменяет картину удельного расхода топлива. Если рассматривать значения эксцесса, то мы видим меньшее значение остроты пика у выборки под влиянием ветровых нагрузок, так как у выборки без влияния ветровых нагрузок больше значений, приближенных к среднему удельному расходу топлива. Для выборок с фиксированной максимальной нагрузкой на ось среднее значение удельного расхода топлива увеличилось на 3,4 %. Медиана выборки с наличием ветровых нагрузок сместилась на 3,2 % в сторону увеличения. Также видно увеличение значения дисперсии. Прослеживается и смещение асимметрии вправо. Однако прирост оказался меньшим, чем для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось. Значения эксцесса для поездов без влияния ветровых нагрузок имеет отрицательное значение, что характерно для выборок груженого распределения, где значения удельного расхода топлива имеют минимальные значения и незначительно отклоняются от среднего.

## Выводы

Анализируя две полученные независимые выборки для поездов с фиксированной минимальной и фиксированной максимальной нагруз-

кой на ось, видно, что под воздействием ветровых нагрузок среднее значение удельного расхода топлива больше возросло для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось на 6,3 % против 3,4 %. Это очевидно, так как: при ведении поездов весами, близкими к критическому для тепловоза на данном участке, произведенная мощность, а соответственно, и вырабатываемая энергия практически полностью расходуются на тягу и на выполнение перевозочной работы. Немаловажным является и то, что порожним поездам оказывается большее удельное сопротивление движению, в частности от ветра, из-за создания в открытых люках, дверцах, межвагонном пространстве, полостях вагонов воздушных потоков завихрения.

## Библиографический список

1. Годовой отчет ОАО «РЖД» 2018 г. — 2018. — URL: <https://ar2018.rzd.ru/ru>.
2. Феоктистов В. П. Проблема нормирования и экономии энергозатрат в тяге поездов / В. П. Феоктистов, Н. Н. Сидорова, В. Ю. Погосов // ВИНТИ. Транспорт. Наука, техника, управление. — М., 2009. — № 1. — 64 с.
3. Мугинштейн Л. А. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов: сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, С. А. Виноградов и др. — М.: ВМГ-Принт, 2014. — 144 с.
4. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябло. — М.: Интекст, 2012. — 80 с.
5. АС ЦОММ Приволжской железной дороги. Автоматизированная система «Интегрированная обработка маршрута машиниста». — URL: <http://ommarc.priv.oao.rzd:8080/comm/index.js>.
6. Weather archive data: данные из архива погодных условий. — URL: [meteo.infospace.ru](http://meteo.infospace.ru).
7. Trivella A. The impact of wind on energy-efficient train control / A. Trivella, P. Wang, F. Corman // Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, 8093. — Zurich, Switzerland.

8. Shah I. A. Characterizations through generalized and dual generalized order statistics, with an application to statistical prediction problem / I. A. Shah, H. M. Barakat, A. H. Khan // *Statistics & Probability Letters*. — 2020. — Vol. 163. — Article № 108872.

9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — М.: Высшая школа, 1977. — 429 с.

10. Kawai R. Adaptive importance sampling Monte Carlo simulation for general multivariate probability laws / R. Kawai // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 2017. — Vol. 319. — Pp. 440–459.

11. Сидорова Н. Н. Расчет эффективности мероприятий по управлению перевозками на основе диаграммы

энергобаланса / Н. Н. Сидорова, А. А. Бакланов // Тез. докл. науч.-пр. конф. «Современные проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте». — М., 2009. — С. III-12.

Дата поступления: 09.06.2022

Решение о публикации: 01.08.2022

**Контактная информация:**

ГРЕБНЕВ Иван Алексеевич — аспирант;

lokomotiv197309@gmail.com

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, проф.; olegp@mail.ru

СИДОРОВА Наталья Николаевна — д-р техн. наук, ст. науч. сотр.; sidco50@mail.ru

## Statistical Analysis of Train Flow on Pallasovka — Verkhniy Baskunchak Section with the Purpose of Wind Burden Identification

I. A. Grebnev, N. N. Sidorova, O. E. Pudovikov

Russian University of Transport (MIIT), 9b9 Obrazcova Street, Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Grebnev I. A., Sidorova N. N., Pudovikov O. E. Statistical Analysis of Train Flow on Pallasovka — Verkhniy Baskunchak Section with the Purpose of Wind Burden Identification // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 550–557. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-550-557

### Summary

**Purpose:** The given article is devoted to energy consumption problematics. The article relevance is especially high for our country steppe regions where high speed winds prevail most of the year that have a significant impact on fuel and energy resource (FER) consumption increase in train traction. This question is open and no analysis methods have been developed. Also, in locomotive depots, there is no clear energy expenditure normalization for train traction under exposure to additional drag to movement. Wind burden impacting train cars is one of the essential factors affecting energy consumption in a traction. **Methods:** The article shows high significance of this problem for Russian Railways (“Russian Railways” JSC). The article analyzes main factors, affecting fuel and power consumption, and major methods of normalization for FER. For the consideration, Pallasovka — Verkhniy Baskunchak section of Privolzhskaya railway in the traction with 2ТЭ25КМ series diesel locomotive was chosen. Histograms of specific fuel consumption for trains with fixed minimal and maximal axle loads were built and analyzed on the basis of samples from the given foot-plate routes. **Results:** Conclusions on the effect of wind loads on specific fuel consumption were made basing on the numerical characteristics of the obtained samples. Contributions of wind loads to a significant increase in a specific fuel consumption have been proved in the article. Moreover, wind burden impact is higher for empty trains. **Practical significance:** The need to clarify fuel consumption norm is shown. The norm adjustment will allow to improve definition and record accuracy for energy resource expenditures at their normalizing in locomotive depots. The proposed adjustments can be recommended for a practical use on the considered section.

**Keywords:** EFR, energy saving, energy efficiency, fuel specific consumption, wind burdens.

## References

1. *Godovoy otchet OAO «RZhD» 2018 goda* [Annual report of Russian Railways 2018]. 2018. Available at: <https://ar2018.rzd.ru/ru>. (In Russian)
2. Feoktistov V. P., Sidorova N. N., Pogosov V. Yu. *Problema normirovaniya i ekonomii energozatrat v tyage poezdov. VINITI. Transport. Nauka, tekhnika, upravlenie* [The problem of rationing and saving energy costs in train traction. VINITI. Transport. Science, technology, management]. Moscow, 2009, I. 1, 64 p. (In Russian)
3. Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Vinogradov S. A. *Sovremennaya metodologiya tekhnicheskogo normirovaniya raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov lokomotivami na tyagu poezdov* [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 Russian)
4. Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov* [Energy-optimal methods of train traffic control]. Moscow: Intekst Publ., 2012. 80 p. (In Russian)
5. *AS TsOMM Privolzhskoy zheleznoy dorogi. Avtomatizirovannaya sistema «Integriruyemaya obrabotka marshruta mashinista»* [AS TsOMM Privolzhskaya railway. Automated system “Integrated processing of the driver’s route”]. Available at: <http://ommarc.priv.oao.rzd:8080/comm/index.js>. (In Russian)
6. Weather archive data: dannye iz arkhiva pogodnykh usloviy. Available at: [meteo.infospace.ru](http://meteo.infospace.ru)
7. Trivella A., Wang P., Corman F. The impact of wind on energy-efficient train control. Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, 8093, Zurich, Switzerland
8. Shah I.A., Barakat H.M., Khan A. H. Characterizations through generalized and dual generalized order statistics, with an application to statistical prediction problem. *Statistics & Probability Letters* 2020, vol. 163, Article №108872
9. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1977. 429 p. (In Russian)
10. Kawai R. Adaptive importance sampling Monte Carlo simulation for general multivariate probability laws. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2017, vol. 319, pp. 440–459.
11. Sidorova N. N., Baklanov A. A. *Raschet effektivnosti meropriyatiy po upravleniyu perezovkami na osnove diagrammy energobalansa* [Calculation of the effectiveness of transportation management measures based on the energy balance diagram]. Moscow, 2009. (In Russian)

Received: June 09, 2022

Accepted: August 01, 2022

### Author’s information:

Ivan A. GREBNEV — Postgraduate Student;

[lokomotiv197309@gmail.com](mailto:lokomotiv197309@gmail.com)

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; [olegep@mail.ru](mailto:olegep@mail.ru)

Natalia N. SIDOROVA — Dr. Sci. in Engineering, Senior Researcher; [sidco50@mail.ru](mailto:sidco50@mail.ru)