

УДК 629.463

Разработка теоретико-математической модели для оптимизации распределения тормозного усилия грузовых вагонов при неоднородном износе тормозных колодок в условиях потележечного торможения

Е. А. Коченов, Д. Г. Евсеев

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

Для цитирования: Коченов Е. А., Евсеев Д. Г. Разработка теоретико-математической модели для оптимизации распределения тормозного усилия грузовых вагонов при неоднородном износе тормозных колодок в условиях потележечного торможения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 117–126. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-117-126

Аннотация

Цель: Разработка математической модели для оптимизации распределения тормозного усилия при потележечном торможении с учетом неоднородного износа тормозных колодок грузовых вагонов, что является одной из основных причин снижения эффективности тормозной системы и безопасности движения. **Методы:** Проведен анализ недостатков традиционной тормозной рычажной передачи, характеризующейся сложностью регулировки и неравномерным износом колодок. Разработана математическая модель, связывающая износ тормозных колодок с силой торможения, коэффициентом трения, скоростью движения и геометрией рычажной передачи. Модель учитывает динамику смещения центра тяжести колодки при неравномерном износе, что является критическим фактором для предотвращения локальных перегрузок. Проведена параметрическая оптимизация конструкции тормозной системы, включающая корректный подбор длины плеч рычагов и управление давлением в тормозных цилиндрах. **Результаты:** Предложена система потележечного торможения с тормозными цилиндрами, расположенными непосредственно у колесных пар и оснащенными автоматическими регуляторами выхода штока. Экспериментальные данные показывают, что предложенная система позволяет снизить дисперсию нормальных сил, действующих на поверхности тормозных колодок, по сравнению с традиционной системой. Разработанная модель обеспечивает более равномерный износ колодок и повышает безопасность эксплуатации за счет минимизации риска блокировки колес. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют внедрить разработанную модель в проектирование новых и модернизацию существующих тормозных систем грузовых вагонов. Применение предложенной системы потележечного торможения обеспечивает повышение срока службы тормозных колодок и снижение количества аварийных ситуаций, связанных с тормозной системой, что в конечном итоге повышает безопасность движения и снижает эксплуатационные затраты.

Ключевые слова: Грузовой вагон, тормозная система, неравномерный износ колодок, математическая модель, оптимизация тормозного усилия, центр тяжести колодки, потележечное торможение, автоматический регулятор штока, равномерный износ.

Актуальность совершенствования тормозных систем грузовых вагонов обусловлена необходимостью повышения безопасности эксплуатации. Традиционная тормозная рычажная передача (ТРП) имеет недостатки: сложность регулировки, неравномерный износ колодок, риск блокировки колес [1, 2]. Переход на потележечное торможение с использованием тормозных цилиндров со встроенными

регуляторами [3, 4] позволяет оптимизировать распределение усилий. Цель работы — разработка математической модели для управления тормозным усилием с учетом износа колодок.

Наиболее распространенные причины выхода из строя рычажной передачи: обрыв тормозной тяги, неправильная регулировка тормозной рычажной передачи (ТРП) и прочие неисправности [4–7].

Неправильно выполненный ремонт или устаревшая технология, применяемая в процессе ремонта, могут стать причиной выхода из строя деталей.

Помимо некачественно проведенного ремонта и влияния человеческого фактора [8], тормозная рычажная передача имеет следующие слабые места:

1. Большое количество подвижных элементов системы в виде рычагов, подвесок и тяг и высокая сложность их регулировки.

2. Малая эффективность системы равномерного износа колодок.

Добавление тормозных цилиндров со встроенным устройством контроля параметров выхода штока, а также переход на потележечное торможение могут являться вариантами улучшения данной конструкции.

На рис. 1 отображена тормозная система грузового вагона с потележечным торможением с одной главной, отличающей ее от других, особенностью — цилиндры, порождающие тормозное усилие, оснащены устройством регуляции выхода штока без вмешательства человека, близко расположены к колесным парам [2, 9–11].

Рис. 2 представляет собой схематическое отображение совокупности рычагов и тяг — результат научных изысканий в границах статьи.

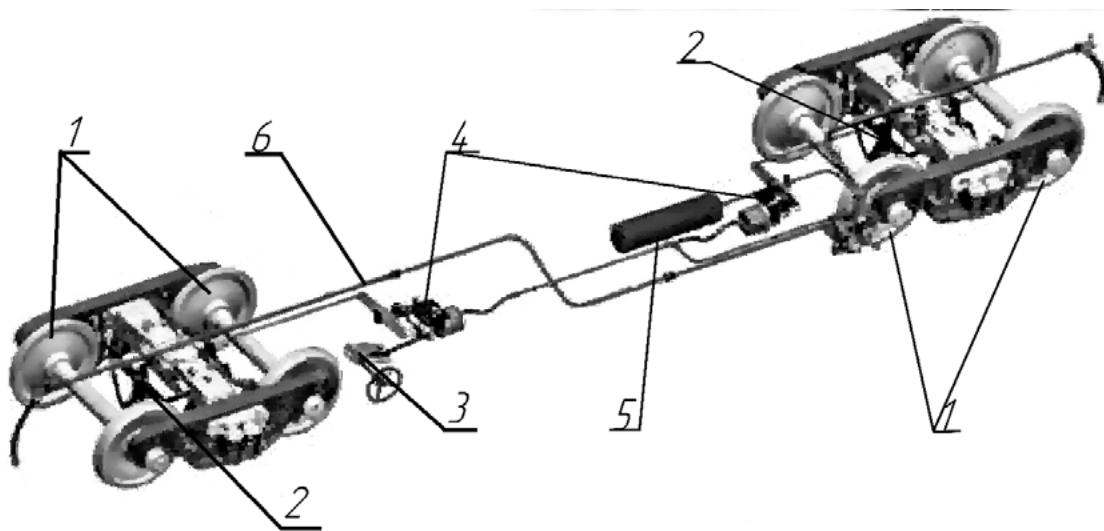


Рис. 1. Визуальное отображение системы, осуществляющей торможение грузовых вагонов с помощью потележечного торможения [9]:

1 — колесная пара; 2 — триангуль, оснащенный колодками; 3 — стояночный тормоз; 4 — тормозной цилиндр со встроенным автоматическим регулятором выхода штока; 5 — запасной резервуар; 6 — тормозная магистраль

Ко всему прочему имеются рекомендации в дополнение к указанному улучшению применить пересчитанные параметры плеч рычагов для обеспечения равномерного распределения износа тормозных колодок.

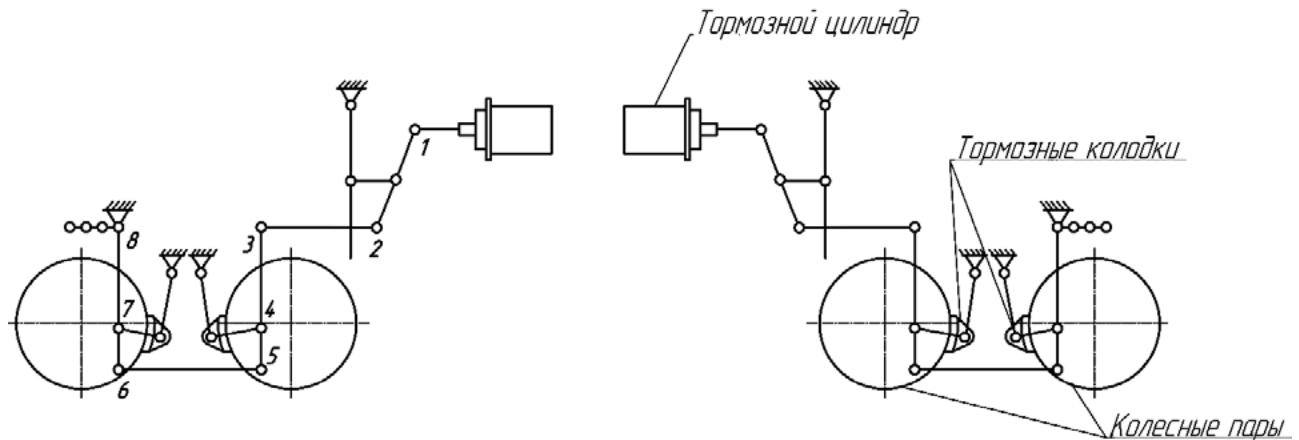


Рис. 2. Схема рычажной передачи для потележечного торможения,
где 1–8 — точки соединения рычагов

В ранних научных изысканиях [1, 2] с помощью математической модели, описывающей усилия рычагов системы и обеспечивающей качественное торможение (рис. 3), был проведен анализ функционирования тормозной рычажной передачи, используемой при потележечном торможении.

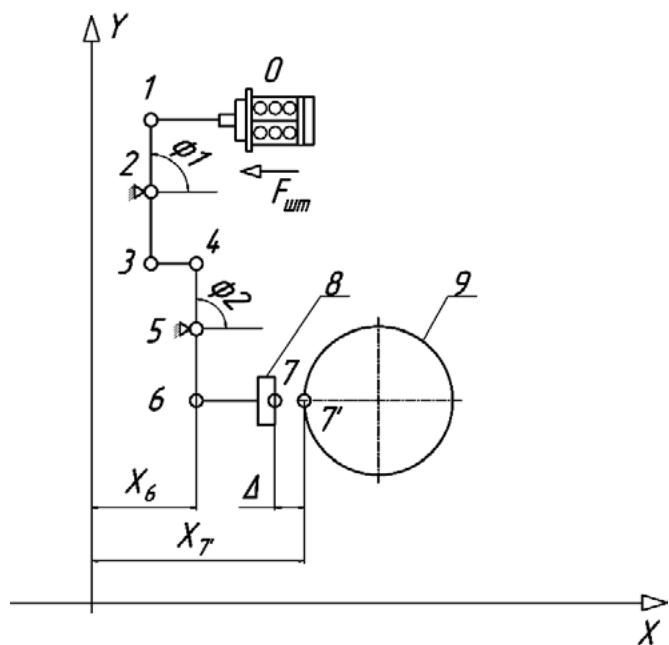


Рис. 3. Схема передаточного механизма рычажной передачи,
где 0 — тормозной цилиндр; 1–7 — точки сопряжения рычагов; 8 — колодка;
9 — колесо; X_7 — позиция колодки без контакта с колесом;
 X_7' — позиция колодки в контакте с колесом; Δ — расстояние между
колесом и тормозной колодкой; ϕ_1, ϕ_2 — угол поворота.

В рамках данной статьи составлена математическая модель для расчета величины изношенности тормозных колодок, при проектировании которой в основу легли такие параметры, как сила торможения, коэффициент трения, скорость движения, давление в тормозном цилиндре и длина рычагов триангуля.

Определив силу торможения, площадь контакта тормозной колодки с колесом и тормозной путь, имеется возможность для расчета величины изнашивания тормозных колодок:

$$W = k_i \frac{F_t}{A_{\text{конт}}} S, \quad (1)$$

где W — износ тормозных колодок;

k_i — коэффициент износа тормозных колодок;

$A_{\text{конт}}$ — площадь контакта тормозной колодки с колесом;

S — тормозной путь;

F_t — сила торможения.

$$S = \frac{V^2}{2a}, \quad (2)$$

где V — скорость движения до начала торможения;

a — тормозное ускорение.

$$a = \frac{F_t}{m}, \quad (3)$$

где m — масса грузового вагона.

На основе параметрических данных указанных зависимостей можно сделать следующее предположение: при заданном соотношении длин рычагов положение центра тяжести тормозной колодки может изменяться — главным образом в зависимости от степени их износа.

Для проверки жизнеспособности выдвинутой гипотезы необходимо получить математическую зависимость, отражающую влияние следующих параметров:

- тормозной силы;
- коэффициента трения тормозных колодок;
- скорости движения грузового вагона;
- давления в тормозном цилиндре;
- длины рычагов.

Эти параметры воздействуют на положение центра тяжести колодки, что позволяет провести развернутый анализ гипотезы.

Центр тяжести колодки можно определить как точку, вокруг которой уравновешиваются суммарные моменты действующих сил. Величина силы, действующей на колодки, включает:

$$F_{\text{сумм}} = \mu F_t, \quad (4)$$

где μ — коэффициент трения тормозных колодок.

Предположим, длина рычагов триангуля определяет расстояние от оси вращения колеса до точки, где прикладывается сила торможения. Центр тяжести можно оценить по моменту:

$$M = F_{\text{сумм}} d, \quad (5)$$

где d — расстояние от центра тяжести до точки приложения силы.

Используя значения коэффициентов трения тормозных колодок, установленных в предыдущих изысканиях [1, 2], имеется возможность отобразить зависимость момента сил от приложенной тормозной силы для чугунных и композиционных колодок (рис. 4).

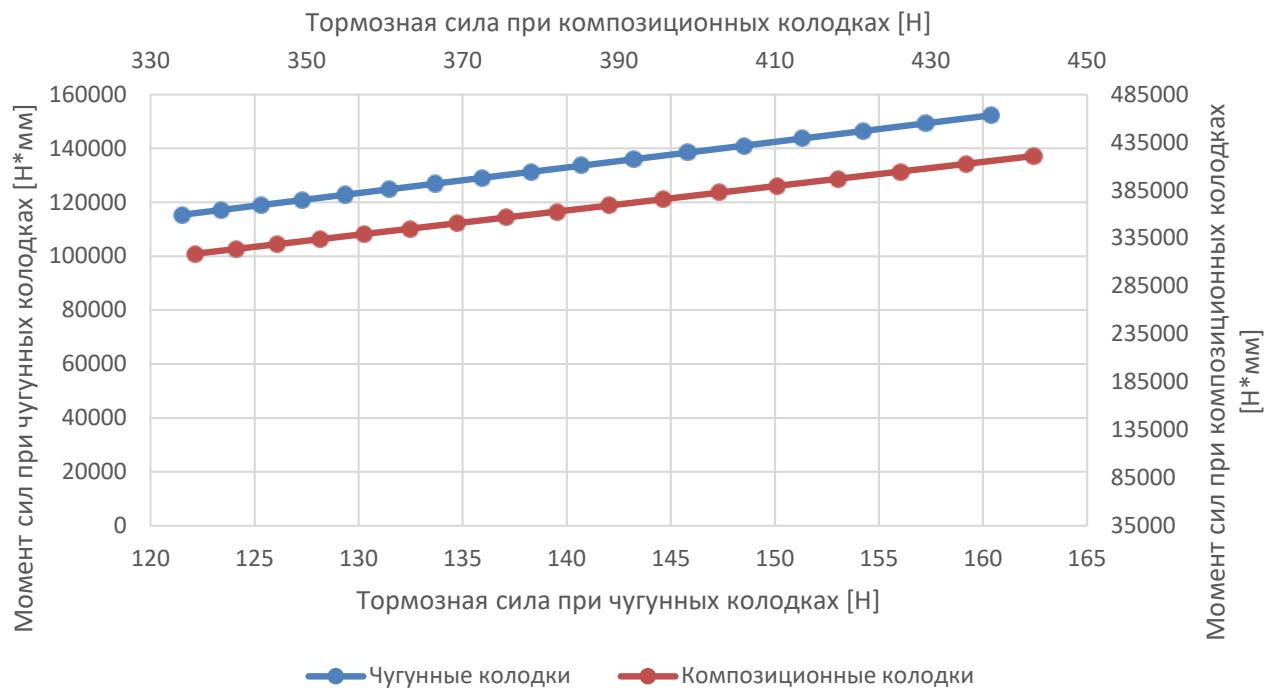


Рис. 4. Зависимости момента сил от приложенной тормозной силы для чугунных и композиционных колодок

Установлено, что распределение веса колодки происходит неравномерно при ее износе, из чего следует, что центр тяжести будет уравновешиваться к более изношенной стороне, что можно учесть с использованием следующей формулы:

$$X(t) = \frac{w_{\text{прав}}(t) - w_{\text{лев}}(t)}{w_{\text{лев}}(t) + w_{\text{прав}}(t)}, \quad (6)$$

где $X(t)$ — исходный центр тяжести в момент времени t ;
 $w_{\text{прав}}(t)$, $w_{\text{лев}}(t)$ — величины износа правой и левой рабочих поверхностей колодки соответственно.

Величина изнашивания колодок имеет прямую зависимость от силы торможения, коэффициента трения, скорости движения, давления в цилиндре, длины рычагов и текущего износа. Следующим образом имеется возможность записать дифференциальные уравнения износа рабочих поверхностей тормозных колодок во времени:

$$\frac{dw_{\text{лев}}}{dt} = \frac{F_t \mu VP}{L} (1 + ax(t)); \quad (7)$$

$$\frac{dw_{\text{прав}}}{dt} = \frac{F_t \mu VP}{L} (1 - ax(t)), \quad (8)$$

где a отражает неравномерность износа между левой и правой поверхностями.

Находя применение вышеуказанных уравнений, получим дифференциальное уравнение для изменения положения центра тяжести:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\frac{dw_{\text{прав}}}{dt} - \frac{dw_{\text{лев}}}{dt}}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}} - x(t) \frac{\frac{dw_{\text{лев}}}{dt} - \frac{dw_{\text{прав}}}{dt}}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}}. \quad (9)$$

Подставляя выражения для $\frac{dw_{\text{лев}}}{dt}$ и $\frac{dw_{\text{прав}}}{dt}$ из выражений (7) и (8) соответственно:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\frac{F_t \mu VP}{L} (1 - ax(t)) - \frac{F_t \mu VP}{L} (1 + ax(t))}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}} - x(t) \frac{\frac{F_t \mu VP}{L} (1 + ax(t)) - \frac{F_t \mu VP}{L} (1 - ax(t))}{w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}}}. \quad (10)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-2ax(t)F_t \mu VP}{L(w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}})} - x(t) \frac{2F_t \mu VP}{L(w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}})}. \quad (11)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{2F_t \mu VPx(t)(a+1)}{L(w_{\text{прав}} + w_{\text{лев}})}. \quad (12)$$

На основании анализа ранее опубликованных исследований [3, 5, 9, 10] и собственных разработок [1, 2], а также математического моделирования работы тормозной рычажной передачи (с учетом влияния на центр тяжести тормозных колодок таких параметров, как тормозная сила, коэффициент трения тормозных колодок, скорость движения грузового вагона, давление в тормозном цилиндре и длина рычагов), сформулированы следующие выводы:

1. Разработанная математическая модель, основанная на механико-динамических уравнениях распределения нормальных сил и коэффициентов трения, количественно демонстрирует, что переход от традиционной рычажной тормозной системы к потележечному торможению позволяет снизить дисперсию нормальных сил, действующих на поверхности тормозных колодок.
2. Параметрическая оптимизация конструкции тормозной системы — в том числе подбор оптимальной длины плеч рычагов для каждого случая и регулирование давления в тормозных цилиндрах на основе полученной модели — позволяет снизить локальные перегрузки и исключить блокировку колес в критических режимах торможения.

Список источников

1. Евсеев Д. Г. Оценка эффективности работы тормозных колодок грузовых вагонов / Д. Г. Евсеев, Е. А. Коченов // Наука и техника транспорта. — 2024. — № 1. — С. 7.
2. Евсеев Д. Г. Усовершенствование тормозной рычажной передачи на основе использования потележечного торможения и новой системы обеспечения равномерного износа тормозных колодок грузовых вагонов / Д. Г. Евсеев, Е. А. Коченов // Наука и техника транспорта. — 2024. — № 4. — С. 14.
3. Кобищанов В. В. Тормозная система для потележечного торможения грузовых вагонов / В. В. Кобищанов, В. В. Синицын // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2020. — № 3. — С. 21–28.
4. Шамонова Н. И. Анализ неисправностей тормозного оборудования вагонов / Н. И. Шамонова // Молодой ученый. — 2017. — № 15(149). — С. 91–95.
5. Каниев Н. К. Пути повышения эффективности работы тормозной системы грузовых вагонов / Н. К. Каниев, Б. К. Кайролла // Наука и техника Казахстана. — 2020. — № 3. — С. 6–11.
6. Иванов А. А. Анализ контролепригодности тормозной системы грузового вагона / А. А. Иванов, М. А. Козарезова // Мир транспорта. — 2017. — № 2. — С. 82–96.
7. Лаптев С. И. Анализ свойств автоматичности тормозов грузовых поездов / С. И. Лаптев, Е. В. Федоров // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационный

транспорт — 2016», посвященная 60-летию основания Уральского государственного университета путей сообщения. — 2017. — С. 291–297.

8. Мышьяков Д. С. Анализ конструкции вагона с раздельным потележечным торможением / Д. С. Мышьяков, А. А. Криворотов, Н. П. Рычков // Молодые науки Сибири. — 2021. — № 1. — С. 5.

9. Сипягин Е. С. Новые подходы к проектированию инновационных тормозных систем грузовых вагонов / Е. С. Сипягин, С. С. Старостин // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 3(52). — С. 36–39.

10. Инагамов С. Г. Совершенствование рычажной передачи для потележечной тормозной системы грузового вагона // Материалы XI международной научно-практической конференции. В 2 частях. — 2021. — Т. 1.

11. Крылов В. И. Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава / В. И. Крылов, В. В. Крылов, В. Н. Ефремов, П. Т. Демушкин. — М.: Транспорт, 1989. — 487 с.

Дата поступления: 15.06.2025

Решение о публикации: 12.08.2025

Контактная информация:

КОЧЕНОВ Егор Александрович — аспирант; egoriko00@yandex.ru

ЕВСЕЕВ Дмитрий Геннадьевич — д-р техн. наук, проф.; evseevdg@gmail.com

A Mathematical Model for Optimized Brake Force Distribution in Freight Wagons with Non-Uniform Brake Shoe Wear in the Bogie-Wise Brake System

E. A. Kochenov, D. G. Evseev

Russian University of Transport (RUT), 9, Obraztsova St., bldg. 9, GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Kochenov E. A., Evseev D. G. A Mathematical Model for Optimized Brake Force Distribution in Freight Wagons with Non-Uniform Brake Shoe Wear in the Bogie-Wise Brake System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 117–126. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-117-126

Summary

Purpose: To create a mathematical model for optimizing the distribution of brake force in railway wagons during bogie-based braking, specifically addressing the issue of non-uniform wear of freight wagon brake shoes, which is one of the main factors impairing braking efficiency and operational safety. **Methods:** An evaluation of the limitations of traditional brake lever transmissions was performed, highlighting their intricate adjustment mechanisms and the uneven brake shoe wear. A mathematical model was created to correlate brake shoe wear with brake force, friction coefficient, vehicle speed, and the geometry of the lever transmission. The model accounts for the dynamic shift of the brake shoe's center of gravity due to uneven wear, which is critical for preventing localized overloads. A parametric optimization of the brake system design was performed, focusing on the appropriate selection of lever arm lengths and the regulation of pressure in the brake cylinders. **Results:** The proposed solution introduces an innovative bogie-wise braking system, featuring brake cylinders positioned directly at wheelsets and equipped with automatic stroke regulators. The

experimental data have demonstrated that the system under investigation significantly reduces the dispersion of normal forces acting on brake shoe surfaces compared to conventional systems. The developed model will ensure more uniform shoe wear and enhance operational safety by minimizing the risk of wheel lockup. **Practical significance:** The research results obtained will enable the integration of the developed model in the design of new freight wagon brake systems and the modernisation of existing ones. Implementing the proposed bogie-wise braking system will extend brake shoe lifespan and reduce the frequency of incidents associated with braking systems, thereby enhancing operational safety while diminishing maintenance costs.

Keywords: Freight wagon, braking system, uneven shoe wear, mathematical model, brake force optimisation, shoe center of gravity, bogie-wise braking, automatic stroke regulator, uniform wear.

References

1. Evseev D. G., Kochenov E. A. Otsenka effektivnosti raboty tormoznykh kolodok gruzovykh vagonov [Evaluation of the efficiency of freight car brake pads]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport]. 2024, Iss. 1, p. 7. (In Russian)
2. Evseev D. G., Kochenov E. A. Usovershenstvovanie tormoznoy rychazhnay peredachi na osnove ispol'zovaniya potelezhechnogo tormozheniya i novoy sistemy obespecheniya ravnomernogo iznosa tormoznykh kolodok gruzovykh vagonov [Improvement of the brake lever transmission based on bogie-by-bogie braking and a new system for uniform wear of freight car brake pads]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport]. 2024, Iss. 4, p. 14. (In Russian)
3. Kobishchanov V. V., Sinitzin V. V. Tormoznaya sistema dlya potelezhechnogo tormozheniya gruzovykh vagonov [Brake system for bogie-by-bogie braking of freight cars]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2020, Iss. 3, pp. 21–28. (In Russian)
4. Shamonova N. I. Analiz neispravnostey tormoznogo oborudovaniya vagonov [Analysis of malfunctions of car braking equipment]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist]. 2017, Iss. 15(149), pp. 91–95. (In Russian)
5. Kaniev N. K., Kayrolla B. K. Puti povysheniya effektivnosti raboty tormoznoy sistemy gruzovykh vagonov [Ways to improve the efficiency of the freight car brake system]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan]. 2020, Iss. 3, pp. 6–11. (In Russian)
6. Ivanov A. A., Kozarezova M. A. Analiz kontroleprigodnosti tormoznoy sistemy gruzovogo vagona [Analysis of the testability of the freight car brake system]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2017, Iss. 2, pp. 82–96. (In Russian)
7. Laptev S. I., Fedorov E. V. Analiz svoystv avtomatichnosti tormozov gruzovykh poездов [Analysis of automatic properties of freight train brakes]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii “Innovatsionnyy transport — 2016”, posvyashchennaya 60-letiyu osnovaniya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Innovative Transport — 2016”, dedicated to the 60th anniversary of the Ural State University of Railway Transport]. 2017, pp. 291–297. (In Russian)
8. Mysh'yakov D. S., Krivorotov A. A., Rychkov N. P. Analiz konstruktsii vagona s razdel'nym potelezhechnym tormozheniem [Analysis of the design of a car with separate bogie-by-bogie braking]. *Molodye nauki Sibiri* [Young Sciences of Siberia]. 2021, Iss. 1, p. 5. (In Russian)

9. Sipyagin E. S., Starostin S. S. Novye podkhody k proektirovaniyu innovatsionnykh tormoznykh sistem gruzovykh vagonov [New approaches to designing innovative brake systems for freight cars]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2014, Iss. 3(52), pp. 36–39. (In Russian)
10. Inagamov S. G. Sovrshennstvovanie rychazhnay peredachi dlya potelezhechnoy tormoznoy sistemy gruzovogo vagona [Improvement of the lever transmission for the bogie-by-bogie brake system of a freight car]. *Materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2 chastyakh* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. In 2 parts]. 202, vol. 1. (In Russian)
11. Krylov V. I., Krylov V. V., Efremov V. N., Demushkin P. T. *Tormoznoe oborudovanie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Braking equipment of railway rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1989, 487 p. (In Russian)

Received: June 15, 2025

Accepted: August 12, 2025

Author's information:

Egor A. KOCHENOV — Postgraduate Student; egorikooo@yandex.ru

Dmitry G. EVSEEV — PhD in Engineering, Associate Professor; evseevdg@gmail.com