

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.014.62

doi: 10.30987/2782-5957-2025-4-56-63

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОТРАНСФОРМАТОРА ИЛИ БЛОКИРУЕМОЙ ГИДРОМУФТЫ В ПРИВОДАХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Павел Анатольевич Поляков<sup>1✉</sup>, Максим Сергеевич Панчук<sup>2</sup>, Анжела Алексеевна Лагутина<sup>3</sup>, Полина Юрьевна Урсегова<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> poliakov-pavel2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4709-5568>

<sup>2</sup> maksim06091998@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-0732-6317>

<sup>3</sup> milakova28@rambler.ru

<sup>4</sup> mc\_po@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы применения гидротрансформатора и блокируемой гидромуфты в приводах ленточных конвейеров для повышения энергоэффективности. Проводится анализ основных причин неисправностей жестких соединений приводов ленточного конвейера. В настоящее время применение ленточных конвейеров, скребковых конвейеров с большим спросом пользуются в горной промышленности на открытых карьерах, подземных конвейерных штреках, дробильно-сортировочных комплексах и других сферах производства пищевой и химической промышленности. Этот вид транспортировки

всегда показывал свою высокую производительность из-за его непрерывного и простого обслуживания. Но, его эксплуатация в постоянно исправном состоянии не всегда возможна. Один из вариантов рассматриваемой в статье вопроса это применение блокируемой гидромуфты в приводах. Анализ работы приводов ленточных конвейеров относительно энергоэффективности показывает, что применение таких устройств приводит к экономии электроэнергии до 20 %.

**Ключевые слова:** гидротрансформатор, гидромуфта, усилие, крутящий момент, привод, конвейер.

Ссылка для цитирования:

Поляков П.А. Анализ применения гидротрансформатора или блокируемой гидромуфты в приводах ленточных конвейеров для повышения энергоэффективности / П.А. Поляков, М.С. Панчук, А.А. Лагутина, П.Ю. Урсегова // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 4. – С. 56-63. doi: 10.30987/2782-5957-2025-4-56-63.

Original article

Open Access Article

## ANALYSIS OF USING A TORQUE CONVERTER OR A LOCKING HYDRAULIC COUPLING IN BELT CONVEYOR DRIVES TO INCREASE THEIR ENERGY EFFICIENCY

Pavel Anatolyevich Polyakov<sup>1✉</sup>, Maksim Sergeevich Panchuk<sup>2</sup>, Angela Alekseevna Lagutina<sup>3</sup>, Polina Yuriyevna Ursegova<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> poliakov-pavel2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-4709-5568>

<sup>2</sup> maksim06091998@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-0732-6317>

<sup>3</sup> milakova28@rambler.ru

<sup>4</sup> mc\_po@mail.ru

## Abstract

The paper discusses the use of a torque converter and a locking hydraulic coupling in belt conveyor drives to increase their energy efficiency. The main causes of malfunctions of rigid connections of the belt conveyor drives are analysed. Currently, the use of belt conveyors and scraper conveyors is in great demand in the mining industry in open pits, underground conveyor drifts, crushing and screening complexes and other areas of the food and chemical industry. This type of transportation has always shown its high productivity due to its

uninterrupted and easy maintenance. However, its operation in a permanently serviceable condition is not always possible. One of the ways to solve this problem discussed in the paper is the use of a locking hydraulic coupling in drives. An analysis of the operation of belt conveyor drives related to energy efficiency shows that the use of such devices leads to energy savings of up to 20 %.

**Keywords:** torque converter, hydraulic coupling, force, torque, drive, conveyor.

## Reference for citing:

*Polyakov PA, Panchuk MS, Lagutina AA, Ursegova PYu. Analysis of using a torque converter or a locking hydraulic coupling in belt conveyor drives to increase their energy efficiency. Transport Engineering. 2025;4:56-63. doi: 10.30987/2782-5957-2025-4-56-63.*

## Введение

В настоящее время в горной промышленности на открытых карьерах, подземных конвейерных штреках, дробильно-сортировочных комплексах и других сферах производства пищевой и химической промышленности широкое применение получили ленточные конвейеры [1, 3]. В их приводах используют асинхронные короткозамкнутые электродвигатели (ЭД), цилиндрические и коническо-цилиндрические редукторы, жесткие и гидродинамические муфты. Конвейеры оснащены автоматическим натяжным устройством, обеспечивающим заданное натяжение ленты. Однако его эксплуатация в постоянно исправном состоянии не всегда возможна. Один из вариантов рассматриваемой в статье темы – это применение блокируемой гидромуфты в приводах [4]. При непрерывной и длительной эксплуатации часто выходят из строя основные узлы и детали приводов ленточных конвейеров. В основном при использовании цилиндрических редукторов и жестких муфт приводит к частым остановкам конвейерных линий. Основные причины неисправности жестких соединений приводов ленточного конвейера включают:

- износ и усталость материалов – со временем под действием нагрузок и вибраций происходит износ деталей соединений (шпонок, болтов, фланцев), что приводит к их разрушению;

- неправильная установка или сборка –

не соосность валов, недостаточная или чрезмерная затяжка крепежных элементов может вызвать перекосы и напряжения в соединении;

- перегрузка привода – работа с нагрузкой, превышающей расчетную, вызывает повышенные механические напряжения в соединениях, что приводит к их быстрому выходу из строя;

- вибрации и удары – нерегулярные нагрузки, вызванные неравномерным поступлением материала или неисправностью роликов, приводят к ударным нагрузкам на соединения;

- коррозия – воздействие агрессивных сред или влаги способствует коррозии металлических элементов, снижая их прочность (особенно в подземных условиях шахт);

- недостаточное или неправильное обслуживание – отсутствие регулярной проверки и затяжки соединений, а также несвоевременная замена изношенных деталей;

- температурные перепады – чередование нагрева и охлаждения может вызвать тепловые деформации, которые ослабляют жесткие соединения;

- некачественные материалы или дефекты изготовления – использование материалов с низкими механическими характеристиками или наличие производственных дефектов в деталях;

Чтобы снизить риск выхода из строя

жестких соединений, рекомендуется регулярно проводить техническое обслуживание,

использовать качественные материалы и соблюдать технологии монтажа.

### Постановка задачи

Назначение привода – создать тяговое усилие на приводном барабане с целью обеспечения определенной скорости движения ленты с транспортируемым грузом, как в момент пуска конвейера, так и в стационарном режиме работы [2].

На рис. 1 представлены схемы ленточных конвейеров с двумя и тремя приводами. Схема на рис. 1, а соответствует конвейеру двух приводному, а на рис. 1, б – трех приводному.

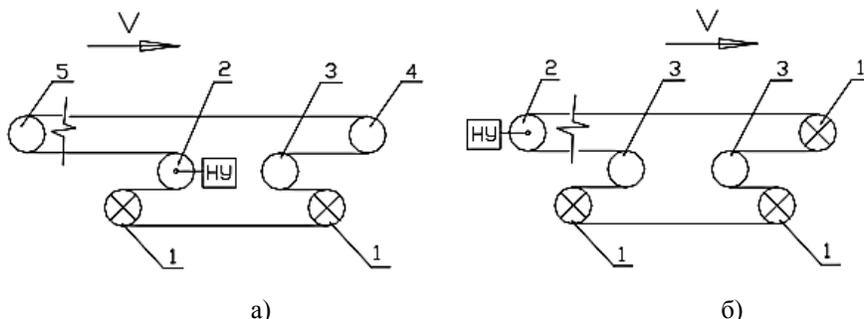


Рис. 1. Схема расположения приводов конвейера: а – с двумя приводными барабанами, б – с тремя приводными барабанами (1 – приводной, 2 – натяжной, 3 – отклоняющий, 4 – головной, 5 – концевой барабаны, NU – натяжное устройство, V – скорость ленты)

*Fig. 1. Scheme of conveyor drive arrangement: a – with two drive drums, b – with three drive drums (1 – drive drum, 2 – tension drum, 3 – deflecting drum, 4 – head drum, 5 – end drum, NU – tensioning device, V – belt speed)*

Одной из решаемых задач по обеспечению долговечности и бесперебойности работ ленточных конвейеров является их оборудование (или оснащение) приводом с гидротрансформаторами или гидромуфтами (рис. 2). Гидравлическая муфта (она же гидротрансформатор представляют собой закрытые механизмы полуавтоматических и автоматических коробок передач в автомобилях.

Оба устройства используются для передачи крутящего момента от ведущего вала двигателя к автоматической коробке передач. В обоих механизмах между ведущим и ведомым валами нет жесткой связи, поэтому они передают вращение от одной оси к другой плавно и равномерно, без каких-либо рывков и толчков, этот принцип важен и для ленточных конвейеров.

Устройство и принцип работы гидротрансформатора: по сути, гидротрансформатор – это та же гидромуфта, в которой между

вращающимися колёсами добавлено третье лопастное колесо – реактор (статор). Посредством муфты свободного хода оно может вращаться на ведущем валу, образуя единое целое с насосным колесом. Это происходит до тех пор, пока обороты вращения насоса и турбины различаются. Как только они уравниваются, реактор начинает вращаться независимо от насоса, превращая гидротрансформатор в гидромуфту.

Как известно, главным достоинством гидромуфты и гидротрансформатора является возможность плавного изменения крутящего момента, на трансмиссию от двигателя. Еще одним важным плюсом этих устройств является ограничение максимального передаваемого крутящего момента [5]. Иными словами, эти механизмы никогда не смогут передать слишком большое вращение, способное повредить механизмы. Эти механизмы предохраняют от перегрузок на приводной двигатель, особенно в момент пуска [6].

Анализ работы приводов ленточных

конвейеров относительно энергоэффективности показывает, что применение таких устройств приводит к экономии электроэнергии до 20 %. Максимальный эффект достигается при работе в условиях неравномерной загрузки или частых пусках и остановках. [7, 8].

Самый большой недостаток гидротрансформатора и гидромукты, в свою очередь, является низкий КПД в сравнении с механическими муфтами, имеющими жесткую связь ведущего и ведомого вала. Часть крутящего момента в них попросту тратится на перемешивание масла. Вместо того чтобы превратиться в полезный крутящий момент на выходном валу энергия вращения трансформируется в тепло, нагревая корпус муфты. Соответственно, это приводит к снижению мощности электродвигателя.



Рис. 2. Гидромукта  
*Fig. 2. Hydraulic coupling*

В предлагаемом варианте применения гидротрансформатора или блокируемой гидромукты в приводах ленточных конвейеров имеет следующие преимущества:

### Разработанные методы и предлагаемые модели

Для снижения затрат на регулярное обслуживание предлагаются автоматизация работы гидромукты на приводе ленточного конвейера, что позволяет значительно снизить необходимость вмешательства человека

- плавный пуск и остановка – гидромукта обеспечивает мягкий запуск конвейера без рывков и ударных нагрузок, что снижает износ ленты и механических частей;

- защита от перегрузок – при возникновении перегрузки гидромукта позволяет частично проскальзывать, защищая двигатель и редуктор от повреждений;

- снижение пиковых нагрузок – плавное изменение крутящего момента снижает динамические нагрузки на соединения и элементы привода, увеличивая их ресурс;

- компенсация колебаний нагрузки – гидромукта сглаживает неравномерности в подаче материала, обеспечивая более стабильную работу конвейера [8];

- защита от заклинивания – при блокировке ленты гидромукта ограничивает передаваемый момент, предотвращая поломки и выход из строя редуктора или двигателя;

- увеличение срока службы оборудования – за счет снижения ударных нагрузок продлевается срок службы ленты, роликов, подшипников и других компонентов;

- снижение энергопотребления – плавный запуск и остановка позволяют экономить электроэнергию за счет снижения пусковых токов двигателя.

Ограничения и особенности применения:

- стоимость – гидромукта увеличивает стоимость привода и требует дополнительных затрат на обслуживание;

- потери мощности – небольшие потери энергии в процессе передачи крутящего момента из-за трения в рабочей жидкости;

- необходимость контроля уровня и состояния рабочей жидкости – требуется регулярное обслуживание, чтобы поддерживать эффективность работы.

и повысить эффективность работы оборудования. Для этого можно использовать следующие методы и системы [9]:

1. Применение системы автоматического управления (САУ)

Установка программируемого логического контроллера (ПЛК), который будет:

- управлять пуском и остановкой гидромуфты по заранее заданным параметрам;
- регулировать заполнение рабочей жидкости в зависимости от нагрузки на конвейер;
- осуществлять плавный разгон и торможение в автоматическом режиме.

#### 2. Датчики и системы мониторинга:

- датчики давления и температуры рабочей жидкости – для контроля состояния гидромуфты и предотвращения перегрева или потери давления;
- датчики крутящего момента и нагрузки – для регулировки передачи крутящего момента в зависимости от нагрузки на конвейер;
- датчики скорости вращения вала – для контроля и стабилизации скорости ленты конвейера.

3. Интеграция с системой управления конвейером, т.е. объединение управления гидромуфтой с общей системой управления конвейером позволяет:

- автоматически запускать и останавливать конвейер в зависимости от загруженности и потребностей производственного процесса;
- синхронизировать работу нескольких приводов на длинных конвейерах для предотвращения перекосов и перераспределения нагрузки.

4. Использование частотного преобразователя, хотя частотные преобразователи применяются в основном для управления электродвигателями, их можно использовать в связке с гидромуфтой для:

- точного регулирования скорости вращения;
- обеспечения плавного разгона и остановки;
- оптимизации энергопотребления за счет регулировки частоты вращения вала в зависимости от нагрузки.

5. Автоматическая система смазки и контроля рабочей жидкости:

- система автоматической подачи рабо-

чей жидкости в гидромуфту в зависимости от условий эксплуатации;

- контроль уровня и состояния (загрязненности) рабочей жидкости с уведомлением о необходимости замены.

6. Система диагностики и предиктивного обслуживания:

- внедрение системы предиктивного обслуживания, которая на основе данных от датчиков прогнозирует возможные неисправности;
- автоматическая сигнализация о необходимости технического обслуживания или замены компонентов.

7. Удаленный мониторинг и управление:

- подключение к системе *SCADA* для удаленного мониторинга и управления работой гидромуфты;
- отправка уведомлений о неисправностях и критических состояниях через *SMS* или *e-mail*.

Для обеспечения эффективной работы приводов ленточных конвейеров рекомендуется рассмотреть следующие модели гидромуфт:

Гидромуфты *Fludex* от компании *Flender*: Эти гидродинамические муфты обеспечивают передачу мощностей до 1900 кВт и скорости вращения до 5000 об/мин. Они способствуют мягкому пуску механизмов без ударных нагрузок, позволяют разгонять большие массы при уменьшенной нагрузке на электродвигатель и обеспечивают простоту настройки крутящего момента путем изменения уровня рабочей жидкости.

Гидромуфты серии *KX* от компании *Transfluid*: Муфты этой серии особенно подходят для передачи больших мощностей с высокой инерцией, что делает их идеальными для применения в приводах ленточных конвейеров и мельниц.

Гидромуфта для электродвигателя обеспечивает плавный запуск. Гидродинамическая муфта *KX* со специальной рабочей полостью, спроектированная и запатентованная для запуска машин с большими инерциями, приводимых электродвигателем.

Рабочая полость состоит из двух емкостей и дозирующей трубки. Дозирующая трубка работает как насос, передавая масло из одной емкости в другую, и, следовательно, в рабочую полость посредством клапанов, регулируемых снаружи. Этот двойной проход жидкости позволяет увеличить время запуска, значительно уменьшить крутящий момент запуска и потребляемые токи со стороны двигателя, изолируя виртуальным способом эффект инерции, который должен был быть передан машине [10].

Гидродинамическая муфта постоянно заполнена может работать как на масле, так и на растворе воды и гликоля. Рассмотрим функционирование гидродинамической муфты постоянного заполнения серии *KX*.

Количество жидкости в рабочей полости больше, чем в соответственных гидромуфтах с постоянным заполнением ввиду того, что уровень жидкости позиционируется снизу вращающейся оси. Уменьшение количества масла в рабочей полости допускает передачу во время запуска пониженных крутящих моментов. Во время передачи дозирующая трубка передает жидкость из емкости *A* в емкость *B* и наконечник в рабочую полость, пересекая регулируемый клапан, используемый, чтобы установить время запуска.

Основные характеристики гидромуфты:

1. Начальный пусковой момент ниже 50 % от номинального крутящего момента электродвигателя.

2. Ограничение передаваемого крутящего момента при запуске ниже максимального крутящего момента, передаваемого электродвигателем.

3. *KX* позволяет разбирать муфту без смещения электродвигателя и машины, и значит, без необходимости последующей

### Результаты и их анализ

Применение гидромуфт или гидротрансформаторов в приводах ленточных конвейеров может значительно повысить энергоэффективность за счёт:

1. Снижения пусковых токов:

- гидромуфта обеспечивает плавный

центровки.

На муфты *KX* монтируется легкоплавкая пробка, которая способна освободить от жидкости рабочую полость, в случае каких-либо нарушений, перелить жидкость в резервуар, без выливания жидкости наружу.

4. Муфты *KX* доступны в соответствии со всеми категориями директивы *ATEX 94/9/ЕС* для защиты от взрывоопасных газов и пыли.

Операция по заполнению рабочей жидкостью полости гидродинамической муфты несколько упрощена, за исключением особых случаев, когда нет необходимости менять жидкость во время пробных запусков: время запуска может быть оптимизировано при помощи отверстий, регулируемых снаружи.

Гидромуфта *KX* особенно подходит при передаче больших мощностей с высокой инерцией; типичные применения: мельницы и ленточные конвейеры.

Гидромуфты от компании ООО «ГДМ»: Компания предлагает широкий выбор гидромуфт, включая модели с дополнительной пусковой камерой, тормозным барабаном, варианты со шкивом или на опорах. Эти муфты применяются в различных отраслях промышленности, включая приводы ленточных конвейеров.

При выборе гидромуфты для вашего ленточного конвейера следует учитывать такие параметры, как мощность привода, скорость вращения, условия эксплуатации и требования к плавности пуска. Рекомендуется проконсультироваться с производителями или поставщиками оборудования для подбора оптимальной модели, соответствующей специфическим потребностям на месте эксплуатации.

разгон конвейера, избегая пиковых нагрузок на двигатель. Это снижает пусковые токи на 30...50 %, что уменьшает энергопотребление в момент пуска;

- гидротрансформатор также способствует мягкому запуску, распределяя нагруз-

ку более равномерно.

2. Оптимизация работы под переменной нагрузкой:

- гидромуфты позволяют частично проскальзывать при перегрузках, снижая потребляемую мощность в пиковые моменты. Это особенно эффективно при неравномерной подаче материала;

- гидротрансформаторы автоматически регулируют передаваемый крутящий момент в зависимости от нагрузки, что повышает общую эффективность.

3. Снижение динамических потерь:

- плавное изменение крутящего момента снижает динамические потери в приводе

### Заключение

1. Применение гидротрансформатора или блокируемой гидромуфты в приводах ленточных конвейеров позволяет повысить их энергоэффективность, снизить эксплуатационные расходы, а также продлить срок службы оборудования [10]. Максимальный эффект достигается при работе в условиях неравномерной загрузки или частых пусках и остановках.

2. Автоматизация работы гидромуфты достигается за счет комплексного использования ПЛК, датчиков, частотных преобразователей и систем предиктивного обслуживания

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б., Байбаков О.В., Кирилловский Ю.Л. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов. 4-е изд., стереотипное, перепечатка со 2-го издания. Москва: Издательский Дом «Альянс», 2010. 423 р. – ISBN 5-903-03488-8.
2. Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод: Учебник, ч.2. Гидравлические машины и гидропневмопривод. Москва: РИЦ МГИУ, 2003. 352 р. – ISBN 5-276-00380-7.
3. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Недра, 1991. 333 р. – ISBN 5-247-01007-8.
4. Коперчук А.В., Мурин А.В. Совершенствование блокируемой гидродинамической муфты для при-

и ленте конвейера. Это уменьшает износ компонентов и снижает потребление энергии на 10...15 %.

4. Энергоэффективность в длительном цикле работы за счёт минимизации пиковых нагрузок и плавного запуска общее снижение энергопотребления может достигать 10–20% по сравнению с традиционными жесткими приводами.

5. Комбинированное использование с частотными преобразователями. В связке с частотными преобразователями эффективность повышается еще больше, так как можно точно регулировать скорость и мощность в зависимости от текущей нагрузки.

Это позволяет значительно повысить надежность, производительность и безопасность эксплуатации ленточного конвейера, а также снизить потребность в участии обслуживающего персонала.

3. Установка гидромуфты на приводе ленточного конвейера целесообразна в случаях, когда необходимо обеспечить плавный пуск, защиту от перегрузок и повышение долговечности оборудования. Это особенно актуально для конвейеров большой длины, при тяжелых условиях эксплуатации или частых запусках и остановках.

5. Гост 19587-74. Передачи гидродинамические; термины и определения. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1974. 37 с.
6. <https://www.drive2.ru/b/2568696/>
7. <https://www.nord.com/media/>
8. Иванов И.И., Петров П.П. Анализ работы приводов конвейерных систем. Санкт-Петербург: Машиностроение, 2015. 275 с.
9. Смирнов А.А. Надежность и диагностика гидроприводов. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2018. 312 с.
10. Федоров Д.Д. Современные технологии в гидродинамических передачах. Казань: Казанский государственный технический университет, 2020. 289 с.

## REFERENCES

1. Bashta TM, Rudnev SS, Nekrasov BB, Baybakov OV, Kirillovsky YuL. Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives: textbook for engineering universities. 4th ed. Moscow: Alliance; 2010.
2. Lepeshkin AV, Mikhailin AA, Sheipak AA. Hydraulics and a hydropneumatic actuator: textbook. Moscow: RIC MGIU; 2003.
3. Geyer VG, Dulin VS, Zarya AN. Hydraulics and hydraulic drive: textbook for universities. 3rd ed. Moscow: Nedra; 1991.
4. Koperchuk AV, Murin AV. Improvement of the locking hydrodynamic coupling for mining machinery drives. Tomsk. NTL Publishing House; 2012.
5. GOST 19587-74. Hydrodynamic transmissions. Terms and definitions. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 1974.
6. Hydraulic coupling and torque converter [Internet]. Available from: <https://www.drive2.ru/b/2568696/>
7. Nord Drivesystems [Internet]. Available from: <https://www.nord.com/media/>
8. Ivanov II, Petrov PP. Analysis of the operation of conveyor system drives. Saint Petersburg: Mashinostroenie; 2015.
9. Smirnov AA. Reliability and diagnostics of hydraulic drives. Yekaterinburg: Ural Federal University; 2018.
10. Fedorov DD. Modern technologies in hydrodynamic gears. Kazan: Kazan State Technical University; 2020.

### Информация об авторах:

**Поляков Павел Анатольевич** – аспирант, Брянский государственный технический университет (БГТУ), тел.: +79155376276.

**Панчук Максим Сергеевич** – аспирант, Брянский государственный технический университет (БГТУ), тел.: +79964498354.

**Polyakov Pavel Anatolyevich** – Postgraduate Student, Bryansk State Technical University (BSTU), phone: +79155376276.

**Panchuk Maksim Sergeevich** – Postgraduate Student, Bryansk State Technical University (BSTU), phone: +79964498354.

**Лагутина Анжела Алексеевна** – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Высокотехнологичное транспортное машиностроение» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +8-909-240-76-85.

**Урсегова Полина Юрьевна** – аспирант, Брянский государственный технический университет (БГТУ), Российская тел.: +79051003315.

**Lagutina Angela Alekseevna** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of High-Tech Transport Engineering, Bryansk State Technical University, phone: +8-909-240-76-85.

**Ursegova Polina Yurievna** - Postgraduate Student, Bryansk State Technical University (BSTU), phone: +79051003315.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 05.03.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2025; принята к публикации 26.03.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 05.03.2025; approved after review on 18.03.2025; accepted for publication on 26.03.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**