



ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья

УДК 629.11.02/098

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-147-160

**Характеристики пневмогидравлического  
рекуперативного коникового устройства лесовозного тягача  
с прицепом-ропуском**

**В.И. Посметьев, д-р техн. наук, проф.;** ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

**В.О. Никонов**<sup>✉</sup>, **канд. техн. наук, доц.;** ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

**В.В. Посметьев, канд. физ.-мат. наук, доц.;** ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

**А.Ю. Мануковский, д-р техн. наук, проф.;** ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

**А.Е. Матяшов, аспирант;** ResearcherID: [LPP-4512-2024](https://orcid.org/0000-0002-3505-7483),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3505-7483>

**Е.В. Поздняков, канд. техн. наук, доц.;** ResearcherID: [AAX-9199-2020](https://orcid.org/0000-0003-3904-867x),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru<sup>✉</sup>, victorvpo@mail.ru, mayu1964@mail.ru, matyashov-a@bk.ru, pozd.ev@yandex.ru

---

Поступила в редакцию 22.11.24 / Одобрена после рецензирования 13.02.25 / Принята к печати 16.02.25

---

**Аннотация.** Описаны последствия эксплуатации автопоездов в составе тягачей с прицепами-ропусками в сложных дорожных условиях. Приведены перспективные научные направления, способствующие повышению эффективности работы тягачей с прицепными звеньями. Рассмотрены преимущества разработанного пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой для лесовозного тягача с прицепом-ропуском. Целью работы является исследование влияния параметров пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой на его эффективность и определение их оптимальных значений. На основе математической модели и реализующей ее компьютерной программы выполнена оптимизация конструктивных параметров шаровой опоры пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства, обеспечивающая минимальную амплитуду раскачивания верхней части груженых лесоматериалов и максимальную рекуперированную устройством мощность. Выявлено, что оптимальное плечо расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства при фиксированном плече расположения нижних точек крепления гидроцилиндров 0,35 м составляет 0,35...0,45 м, при этом обеспечиваются средняя рекуперированная

---

© Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Мануковский А.Ю., Матяшов А.Е., Поздняков Е.В., 2026

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

мощность более 13 кВт и амплитуда бокового смещения груза менее 0,27 м. Установлено, что наилучший диапазон давления рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора – 35...50 МПа, рекуперлируемая устройством мощность в этом случае превышает 12,2 кВт, а амплитуда бокового смещения груженных лесоматериалов равняется не более 0,29 м. По результатам 2-факторной оптимизации наилучшее плечо расположения верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,37...0,58 м, а давление рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора – 35...50 МПа. При этом предлагаемое пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство генерирует мощность более 15 кВт, а амплитуда бокового смещения груза не превышает 0,2 м.

**Ключевые слова:** лесовозные дороги, гидроцилиндр, прицеп-ропуск, лесоматериалы, оптимизация, шаровая опора, компьютерный эксперимент, рекуперлируемая мощность, тягач, кониковое устройство, амплитуда бокового смещения, рабочая жидкость

**Для цитирования:** Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Мануковский А.Ю., Матяшов А.Е., Поздняков Е.В. Характеристики пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 147–160. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-147-160>

Original article

## Characteristics of the Pneumohydraulic Recuperative Conical Device of a Hauling Tractor with a Pole Trailer

*Valeryi I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.;* ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

*Vadim O. Nikonov*<sup>✉</sup>, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;* ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

*Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;* ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

*Andrey Yu. Manukovskii, Doctor of Engineering, Prof.;* ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

*Aleksey E. Matyashov, Postgraduate Student;* ResearcherID: [LPP-4512-2024](https://orcid.org/0000-0002-3505-7483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3505-7483>

*Evgeny V. Pozdnyakov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAX-9199-2020](https://orcid.org/0000-0003-3904-867x), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru<sup>✉</sup>, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru, matyashov-a@bk.ru, pozd.ev@yandex.ru

Received on November 22, 2024 / Approved after reviewing on February 13, 2025 / Accepted on February 16, 2025

**Abstract.** The consequences of operating road trains consisting of tractors with pole trailers in difficult road conditions have been described. Promising scientific directions have been presented contributing to increasing the efficiency of tractors with trailed links. The advantages of the developed pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint for a hauling tractor with a pole trailer have been considered. The aim of the work has been to

study the influence of the parameters of a pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint on its efficiency and to determine their optimal values. Based on a mathematical model and the computer program implementing it, the design parameters of the ball joint of a pneumohydraulic recuperative conical device have been optimized, ensuring a minimum swing amplitude of the upper part of loaded timber and the maximum power recuperated by the device. It has been revealed that the optimal lever of the upper attachment points of the hydraulic cylinders in the ball joint of the conical device with a fixed lever of the lower attachment points of the hydraulic cylinders of 0.35 m is 0.35...0.45 m, while providing an average recuperated power of more than 13 kW and an amplitude of lateral displacement of the load less than 0.27 m. It has been established that the best pressure range of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator is 35...50 MPa, the power recuperated by the device in this case exceeds 12.2 kW, and the amplitude of lateral displacement of the loaded timber is no more than 0.29 m. According to the results of 2-factor optimization, the best lever of the upper points of the hydraulic cylinders in the ball joint of the conical device is 0.37 ... 0.58 m, and the pressure of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator is 35 ... 50 MPa. At the same time, the proposed pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint generates a power of more than 15 kW, and the amplitude of the lateral displacement of the load does not exceed 0.2 m.

**Keywords:** logging road, hydraulic cylinder, pole trailer, timber, optimization, ball joint, computer experiment, recuperated power, tractor, conical device, lateral displacement amplitude, hydraulic fluid

**For citation:** Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Manukovskii A. Yu., Matyashov A.E., Pozdnyakov E.V. Characteristics of the Pneumohydraulic Recuperative Conical Device of a Hauling Tractor with a Pole Trailer. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 147–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-147-160>

### Введение

Важным элементом хозяйственного освоения территорий богатых лесными ресурсами является наличие развитой транспортной инфраструктуры, которая включает в себя магистральные лесовозные дороги со сроком службы 20 и более лет, лесовозные дороги в виде веток – от 5 до 10 лет, а также временные лесовозные дороги в виде усов – 1–2 года. Из общей сети постоянных и временных лесовозных дорог 4 % приходится на магистрали, 13 % – на ветки и 83 % – на временные лесовозные дороги. Одной из основных проблем, сдерживающих развитие лесопромышленного комплекса России, является низкий уровень развития и обустроенности лесовозных дорог, особенно временных. Плохое состояние лесовозных дорог ведет к недоиспользованию лесного фонда, снижению производительности труда, ограничению объемов круглогодичного транспортирования по ним лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом, снижению эффективности функционирования лесовозных автопоездов вследствие частых поломок, качества лесоматериалов за счет их повреждения при транспортировании, увеличению конечной себестоимости вывозимых лесоматериалов из-за роста расходов на лесовозные автопоезда при использовании неоптимального маршрута транспортирования [4].

Эффективность применения лесовозных тягачей с прицепами-ропусками зависит прежде всего от соответствия их конструкции дорожным и природно-климатическим условиям эксплуатации. Дорожные условия исполь-

зования лесовозных тягачей с прицепами-ропусками оказывают наиболее сильное влияние на нагруженность его основных узлов и деталей. Традиционные конструкции кониковых поворотных устройств отечественного и зарубежного производства не обеспечивают достаточного снижения динамических нагрузок, возникающих между звеньями лесовозных автопоездов при их движении в условиях плохо обустроенных лесовозных дорог. В результате этого срок службы лесовозных тягачей с прицепами-ропусками неоправданно сокращается, уменьшение пробега лесовозных автопоездов, вызванное преждевременным износом и разрушением его отдельных деталей и узлов, происходит в основном при переходных, а также неустановившихся режимах движения. Поэтому совершенствование напрямую влияющих на производительность конструкций поворотных кониковых устройств для лесовозных тягачей, направленное на повышение их эффективности, является актуальной задачей [6, 7].

Анализ результатов исследований, выполненных российскими и зарубежными учеными в области повышения эффективности тягачей с прицепными звеньями, позволил установить, что существенного улучшения эффективности их функционирования можно достичь за счет: оснащения автопоездов электронными системами мониторинга их эксплуатационных параметров; увеличения полезной нагрузки и снижения массы лесовозного автопоезда; уточнения установленных ограничений на общий вес лесовозных автопоездов; сокращения времени нахождения автопоезда на лесозаготовительных площадках и лесопромышленных предприятиях; планирования поставок лесоматериалов на первичную переработку; совершенствования способа определения объема лесоматериалов; обоснованного выбора мест и средств погрузки лесоматериалов на автопоезд; совершенствования конструкций тормозных механизмов и прицепных звеньев автопоездов; автоматизации движения тягача с прицепным звеном задним ходом; снижения нагрузки на водителя и улучшения визуального контроля с его стороны путем оптимального чередования работы с отдыхом [8–20].

Многочисленные исследования, выполненные авторами в рамках разработки рекуперативных гидроприводов и рекуперативных сцепных устройств для лесовозного автомобильного транспорта, позволили предложить пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой (рис. 1). Использование такого устройства на лесовозном тягаче с прицепом-ропуском при вывозке лесоматериалов в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог дает возможность: уменьшить влияние динамических нагрузок, возникающих между звеньями автопоезда при неустановившихся режимах движения; рекуперировать кинетическую энергию от масс звеньев с последующим применением преобразованной и накопленной энергии рабочей жидкости в гидравлическом технологическом оборудовании автопоезда; сократить расход топлива тягачом; повысить надежность рамы тягача и деталей коникового устройства; улучшить за счет повышения плавности хода автопоезда комфортность при движении [5].

Целью исследования является оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой для лесовозного тягача с прицепом-ропуском.

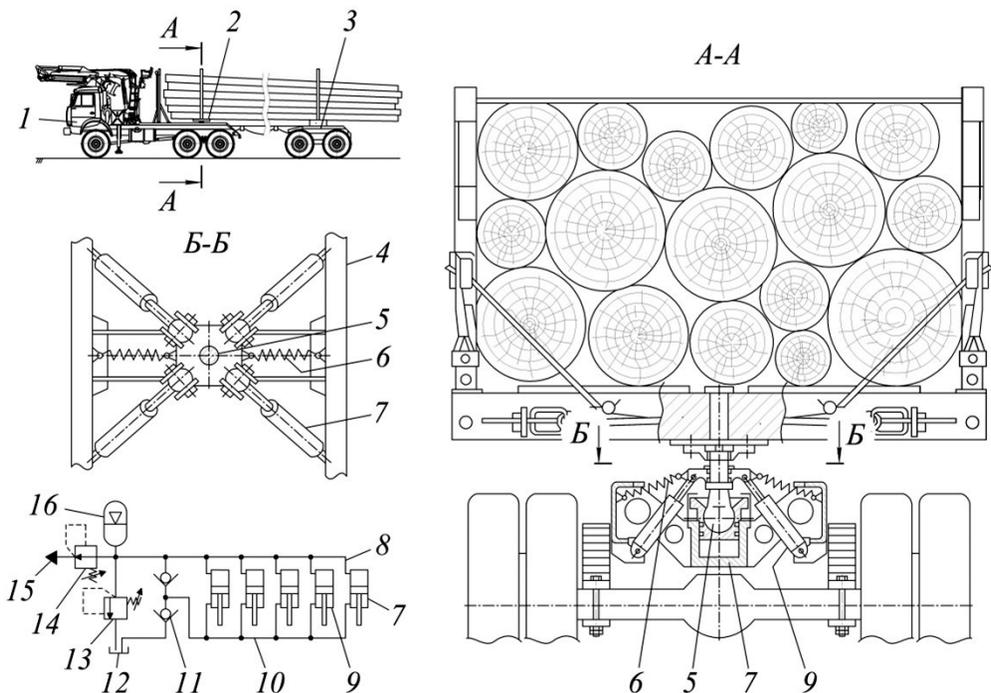


Рис. 1. Схема размещения пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой на лесовозном тягаче с прицепом-ропуском:

1 – тягач; 2 – кониковое устройство; 3 – ропуск; 4 – рама тягача; 5 – шаровая опора; 6 – пружина; 7 – опорный гидроцилиндр; 8, 10 – трубопроводы; 9 – гидроцилиндр; 11 – обратный клапан; 12 – гидробак; 13, 14 – предохранительный и редуционный клапаны; 15 – порт; 16 – пневмогидроаккумулятор

Fig. 1. The layout of a pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint on a hauling tractor with a pole trailer: 1 – tractor; 2 – conical device; 3 – pole trailer; 4 – tractor frame; 5 – ball joint; 6 – spring; 7 – support hydraulic cylinder; 8, 10 – pipelines; 9 – hydraulic cylinder; 11 – check valve; 12 – hydraulic tank; 13, 14 – safety and pressure-reducing valves; 15 – port; 16 – hydropneumatic accumulator

#### Объекты и методы исследования

Объект исследования – пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой, установленное на лесовозном тягаче с прицепом-ропуском. Предмет – оптимальные конструктивные параметры шаровой опоры пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства, обеспечивающие минимальную амплитуду  $A_{\text{bund.iim}}$  раскачивания верхней части грузеных лесоматериалов (груза) и максимальную рекуперированную устройством мощность  $N_{\text{rec.pow}}$ . Для изучения влияния плеча  $R_v$ , расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры и давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора на эффективность пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой разработаны математическая модель и реализующая ее компьютерная программа [1–3].

Особенностью предложенного технического решения является расположение вокруг шаровой опоры коникового устройства 4 гидроцилиндров, обеспечивающих дополнительное силовое взаимодействие между лесовозным

тягачом и грузом. При этом одними из наиболее важных конструктивных параметров такого коникового устройства являются плечи  $R_n$  и  $R_v$  расположения нижних и верхних точек крепления гидроцилиндров.

Из конструктивных соображений плечо  $R_n$  нижних точек крепления гидроцилиндров было принято фиксированным и составляло 0,35 м. Плечо  $R_v$  для верхних точек крепления гидроцилиндров изменялось в серии из 11 компьютерных экспериментов от 0,1 до 0,6 м с шагом 0,05 м. Как видно из рис. 2, в серии экспериментов охватывались случаи, когда верхняя квадратная пластина крепления гидроцилиндров была как меньше (рис. 2, *a, z*), так и больше нижней (рис. 2, *в, e*).

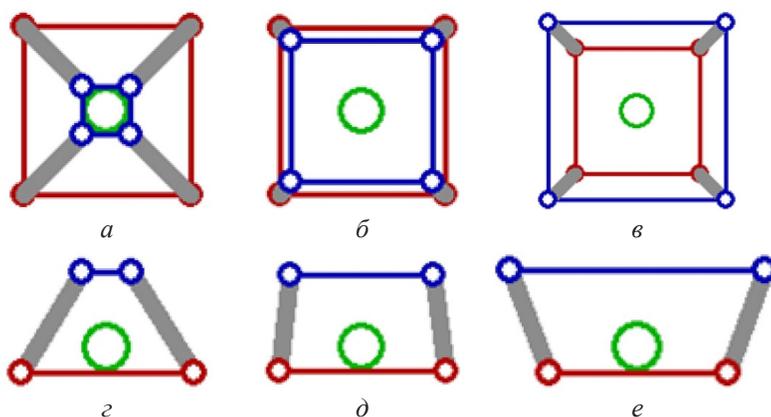


Рис. 2. Конфигурация пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой при различных плечах крепления верхних штоковых шарниров гидроцилиндров: *a-в* – проекции  $XY$ ; *z-e* –  $XZ$ ; *a, z* –  $R_v = 0,1$  м; *б, д* –  $R_v = 0,3$  м; *в, e* –  $R_v = 0,5$  м

Fig. 2. The configuration of a pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint for different mounting levers of the upper rod hinges of the hydraulic cylinders: *a-в* – projections  $XY$ ; *z-e* –  $XZ$ ; *a, z* –  $R_v = 0.1$  m; *б, д* –  $R_v = 0.3$  m; *в, e* –  $R_v = 0.5$  m

Средняя мощность  $N_{\text{rec.pow}}$ , выделяемая пневмогидравлическим рекуперативным кониковым устройством с шаровой опорой, определялась путем усреднения мгновенной мощности, которая рассчитывалась через параметры поступления рабочей жидкости в пневмогидроаккумулятор:

$$N_{\text{rec.pow}} = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} Q_{\text{pn.hydr}}(\tau) \cdot P_{\text{pn.hydr}}(\tau),$$

где  $Q_{\text{pn.hydr}}(\tau)$  – текущий расход рабочей жидкости, поступающей из полостей гидроцилиндров шаровой опоры в полость с рабочей жидкостью пневмогидроаккумулятора;  $\tau$ ,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – шаги интегрирования по времени;  $P_{\text{pn.hydr}}(\tau)$  – текущее давление рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторе.

Амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  раскачивания верхней части груза лесовозного тягча с прицепом-ропуском определялась по следующей зависимости:

$$A_{\text{bund.tim}} = \max_{\tau_1 < \tau < \tau_2} |y|,$$

где  $y$  – поперечная координата одной из моделируемых точек груза;  $|\dots|$  – оператор выделения абсолютного значения числа.

Многофакторная оптимизация позволила изучить одновременное влияние нескольких параметров предлагаемого пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства на его эффективность и определить оптимальные области конструктивных параметров. Для проведения 2-факторной оптимизации выбраны следующие 2 конструктивных параметра: плечо расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства  $R_v$ ; давление пневмогидроаккумулятора  $P_{\text{pn.hydr}}$ . Для оптимизации параметров шаровой опоры пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства выполнена серия экспериментов в разработанной компьютерной программе. При осуществлении экспериментов плечо  $R_v$  изменяли на уровнях 0,2, 0,4, 0,6 м, а давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  – 10, 30, 50 МПа (табл. 1). При этом скорость движения лесовозного автопоезда была принята равной 20 км/ч, масса груза – 20 т, средняя высота неровностей опорной поверхности – 0,2 м.

Таблица 1

**Результаты оптимизационной серии компьютерных экспериментов**  
**The results of an optimization series of computer experiments**

Номер эксперимента	$R_v$ , м	$P_{\text{pn.hydr}}$ , МПа	$N_{\text{rec.pow}}$ , кВт	$A_{\text{bund.tim}}$ , м
1	0,2	10	5,34	0,38
2	0,2	30	9,80	0,35
3	0,2	50	9,28	0,23
4	0,4	10	7,32	0,26
5	0,4	30	14,79	0,23
6	0,4	50	16,56	0,16
7	0,6	10	6,17	0,21
8	0,6	30	12,50	0,19
9	0,6	50	14,21	0,14

Аналитическим образом задачу оптимизации параметров пневмогидравлического рекуперативного поворотного коникового устройства с шаровой опорой можно записать в виде следующей системы:

$$\begin{cases} N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) \rightarrow \max; \\ A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow R_v^{\text{opt}}, P_{\text{pn.hydr}}^{\text{opt}},$$

где  $R_v^{\text{opt}}$ ,  $P_{\text{pn.hydr}}^{\text{opt}}$  – оптимальные плечо  $R_v$  расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства и давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора соответственно.

Благоприятными считаются такие режимы движения лесовозного автопоезда, оснащенного пневмогидравлическим рекуперативным поворотным кониковым устройством, при которых в определенной области факторного пространства  $(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  средняя рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  будет максимальной, а амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  раскачивания верхней части груза – минимальной.

В результате проведения экспериментов в компьютерной программе выявлены аналитические зависимости для функций  $N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  и  $A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$ . Такие зависимости имеют вид многочленов 2-го порядка:

$$K(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) = k_1 R_v^2 + k_2 P_{\text{pn.hydr}}^2 + k_3 R_v P_{\text{pn.hydr}} + k_4 R_v + k_5 P_{\text{pn.hydr}} + k_6,$$

где  $K$  – критерий оптимизации ( $N_{\text{rec.pow}}, A_{\text{bund.tim}}$ );  $k_1 \dots k_6$  – параметры полинома.

Расчет параметров полинома выполняется на основе метода наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{comp.ex}}} \left( K_{\text{analytic}}(R_v^i, P_{\text{pn.hydr}}^i) - K_{\text{comp.ex}}^i(R_v^i, P_{\text{pn.hydr}}^i) \right)^2 \rightarrow \min,$$

где  $i$  – номер эксперимента в компьютерной программе;  $N_{\text{comp.ex}}$  – количество экспериментов;  $K_{\text{analytic}}$  – искомая полиномиальная зависимость критерия  $K$  от исследуемых факторов  $R_v$  и  $P_{\text{pn.hydr}}$ ;  $K_{\text{comp.ex}}^i$  – критерий  $K$  в  $i$ -м эксперименте с параметрами  $R_v^i, P_{\text{pn.hydr}}^i$ .

Под давлением  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора понимается такое настраиваемое рекуперативным гидроприводом давление, ниже которого рабочая жидкость не поступает из гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства в пневмогидравлический аккумулятор. Чем выше давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости, тем реже при движении по неровной дороге проявляется насосный эффект, однако тем больше такие порции гидравлической энергии. Это связано с тем, что рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  пропорциональна как расходу рабочей жидкости, так и давлению, под которым производится этот расход.

Для изучения влияния давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора на эффективность предлагаемого пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства проведена серия из 12 компьютерных экспериментов, в которых давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  изменяли от 5 до 60 МПа с шагом 5 МПа.

### Результаты исследования и их обсуждение

Полученные аналитические зависимости для функций  $N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  и  $A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$ , характеризующие эффективность предлагаемого пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) &= -83,5 R_v^2 - 0,006375 P_{\text{pn.hydr}}^2 + \\ &+ 0,256 R_v P_{\text{pn.hydr}} + 66,162 R_v + 0,457 P_{\text{pn.hydr}} - 9,557; \\ A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) &= 0,833 R_v^2 - 6,667 \cdot 10^{-5} P_{\text{pn.hydr}}^2 + \\ &+ 0,005 R_v P_{\text{pn.hydr}} - 1,167 R_v - 6,667 \cdot 10^{-4} P_{\text{pn.hydr}} + 0,588, \end{aligned}$$

где единицами измерения  $R_v$  являются метры,  $P_{\text{pn.hydr}}$  – мегапаскали,  $N_{\text{rec.pow}}$  – киловатты,  $A_{\text{bund.tim}}$  – метры.

Зависимость рекуперированной мощности  $N_{\text{rec.pow}}$  от плеча  $R_v$  имеет выраженный максимум в диапазоне плеча  $R_v$  от 0,35 до 0,45 м (рис. 3, а). Установлено, что при слишком малом плече  $R_v$  обеспечиваются недостаточно высокий ход поршней гидроцилиндров, а при чрезмерно большом – недостаточные силы, способствующие перемещению поршней гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства. При увеличении плеча  $R_v$  от 0,1 до 0,6 м амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза уменьшается с 0,42 до 0,21 м (рис. 3, б). Это можно объяснить тем, что при малом плече  $R_v$  гидроцилиндры оказывают неудовлетворительное стабилизирующее действие на качающийся на шаровой опоре коникового устройства груз, что сопровождается ее более сильным раскачиванием.

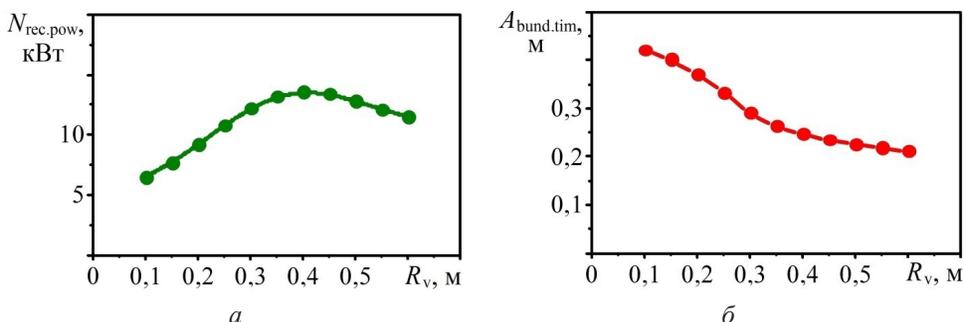


Рис. 3. Влияние плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  шаровой опоры коникового устройства на среднюю рекуперированную мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) и амплитуду бокового смещения груза  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Fig. 3. The influence of the lever of the upper attachment points in the hydraulic cylinders  $R_v$  of the ball joint of the conical device on the average recuperated power  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) and the amplitude of the lateral displacement of the load  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Оптимальное плечо  $R_v$  верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры составляет 0,35...0,45 м, при этом обеспечивается средняя рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  более 13 кВт, и амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза менее 0,27 м.

Установлено, что для увеличения рекуперированной мощности  $N_{\text{rec.pow}}$  оптимальный диапазон давлений  $P_{\text{pn.hydr}}$  составляет 30...50 МПа (рис. 4, а). В данном диапазоне рекуперированная мощность равна 11,9...12,5 кВт. Снижение мощности при низких давлениях объясняется тем, что, хотя порции рабочей жидкости часто поступают в пневмогидравлический аккумулятор, поддерживаемое низким давлением  $P_{\text{pn.hydr}}$  не позволяет получить высокие произведения расхода на давление. При большом давлении  $P_{\text{pn.hydr}}$  порции рабочей жидкости слишком редки – только в случае преодоления нечасто встречающихся высоких неровностей опорной поверхности – и поэтому произведение расхода на давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  оказывается низким из-за малого значения первого показателя.

Амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза имеет почти постоянное высокое значение около 0,32 м в области малых давлений  $P_{\text{pn.hydr}}$  10...25 МПа (рис. 4, б). При дальнейшем увеличении давления с 30 до 60 МПа амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  быстро уменьшается с 0,31 до 0,14 м. С ростом давления рабочая жидкость чаще оказывается запертой в полостях гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства, снижается их податливость, и гидроцилиндры ока-

зывают большее стабилизирующее действие на груз, предотвращая его крен. Оптимальный диапазон давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  пневмогидроаккумулятора составляет 35...50 МПа, при этом рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  превышает 12,2 кВт, а амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза равняется не более 0,29 м.

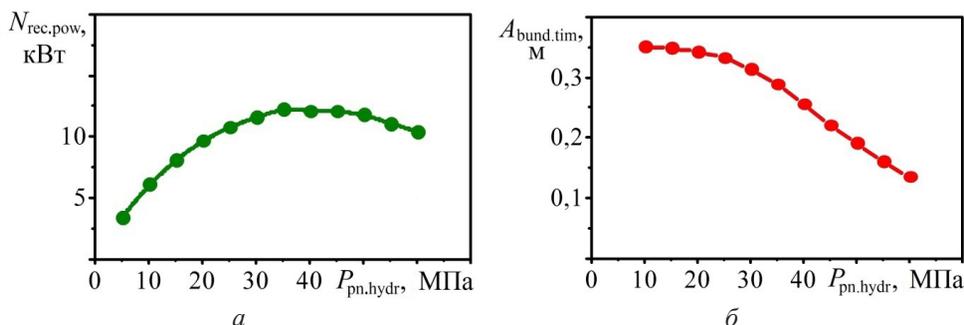


Рис. 4. Влияние давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторе на среднюю рекуперированную мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) и амплитуду бокового смещения груза  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Fig. 4. The influence of the pressure  $P_{\text{pn.hydr}}$  of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator on the average recuperated power  $N_{\text{rec.pow}}$  (a) and the amplitude of the lateral displacement of the load  $A_{\text{bund.tim}}$  (b)

Анализ функции  $N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  и  $A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  выполнен с помощью графиков (рис. 5) и картограмм (рис. 6) оптимизации. Графики дают возможность выявить тенденции влияния конструктивных параметров пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой на его эффективность. Картограммы оптимизации позволяют графоаналитическим методом определить показатели эффективности коникового устройства с шаровой опорой.

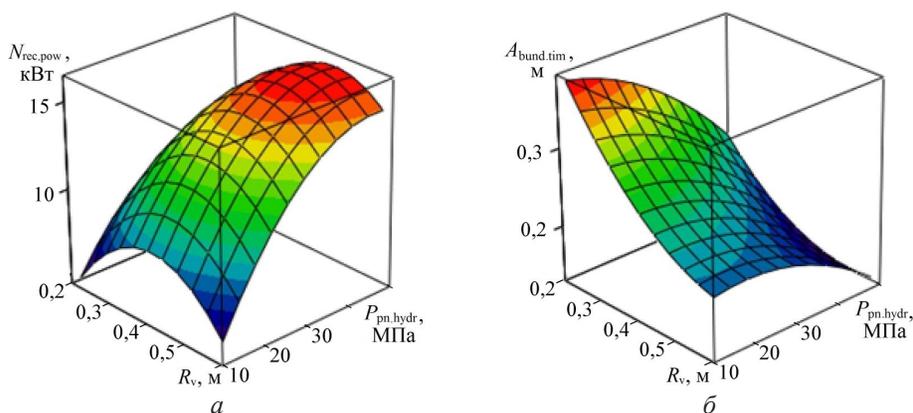


Рис. 5. Графики влияния плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  и давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе на среднюю рекуперированную мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) и амплитуду бокового смещения груза  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Fig. 5. The graphs of the influence of the lever of the upper attachment points of the hydraulic cylinders  $R_v$  and the pressure  $P_{\text{pn.hydr}}$  of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator on the average recuperated power  $N_{\text{rec.pow}}$  (a) and the amplitude of the lateral displacement of the load  $A_{\text{bund.tim}}$  (b)

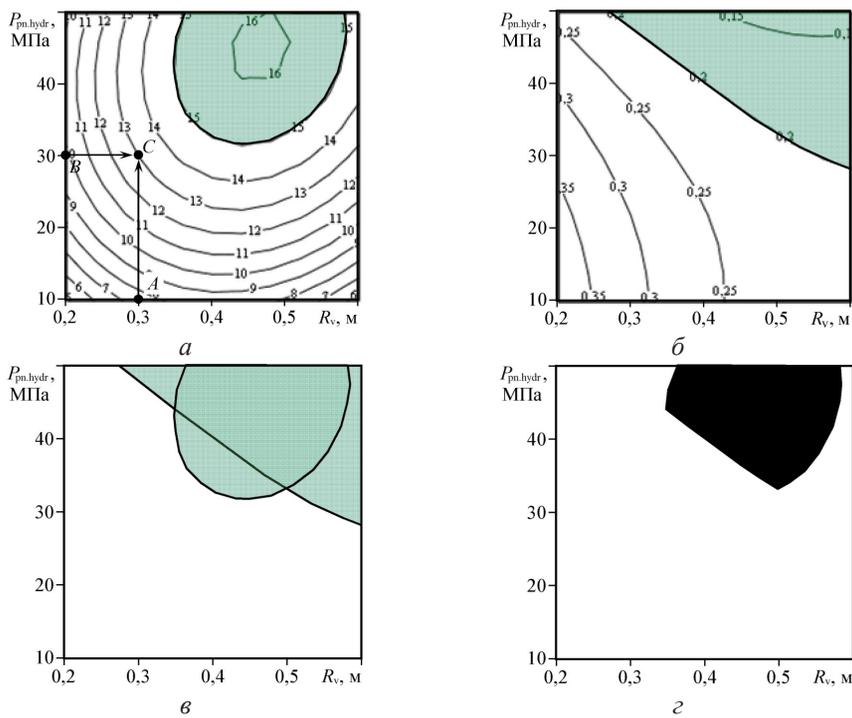


Рис. 6. Картограммы оптимизации плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  шаровой опоры, обеспечивающего максимальную рекуперированную мощность  $N_{rec.pow}$  в зависимости от давления  $P_{pn.hydr}$  рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе и амплитуды  $A_{bund.tim}$  бокового смещения груза:

$$a - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ кВт}; \quad б - A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ м};$$

$$в - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}) \cap A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}); \quad г - \text{оптимальная область}$$

Fig. 6. The cartograms of the optimization of the lever of upper attachment points of the hydraulic cylinders  $R_v$  of the ball joint, providing the maximum recuperated power  $N_{rec.pow}$  depending on the pressure  $P_{pn.hydr}$  of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator and the amplitude  $A_{bund.tim}$  of the lateral displacement of the load:

$$a - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ kW}; \quad б - A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ m};$$

$$в - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}) \cap A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}); \quad г - \text{optimal area}$$

На рис. 6, *a* приведен пример использования картограммы. Если плечо  $R_v$  верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства – 0,3 м (точка *A*) и давление  $P_{pn.hydr}$  рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора составляет 30 МПа (точка *B*), то, проводя из данных точек параллельные линии относительно осей координат, находим точку их пересечения *C*. Эта точка лежит на уровне  $N_{rec.pow} = 13$  кВт. Аналогично осуществляется поиск амплитуды  $A_{bund.tim}$  бокового смещения груза. Основным критерием, определяющим благоприятные области, является возможность пересечения 2 картограмм, которая показывает общую оптимальную область (рис. 6, *в*). На картограмме оптимизации плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  шаровой опоры, обеспечивающего максимальную рекуперированную мощность  $N_{rec.pow}$  в зависимости от давления  $P_{pn.hydr}$  рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторе и амплитуды  $A_{bund.tim}$

бокового смещения груза, линия  $N_{\text{rec.pow}} = 15$  кВт разделяет друг относительно друга благоприятную и неблагоприятную области (рис. 6, а). Для критерия  $A_{\text{bund.tim}}$  линией, разграничивающей благоприятную и неблагоприятную области, принята  $A_{\text{bund.tim}} = 0,2$  м (рис. 6, б).

По расположению выделенной черным цветом оптимальной области (рис. 6, з) в исследуемом факторном пространстве видно, что оптимальное плечо  $R_v$  для верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,37...0,58 м, давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  пневмогидравлического аккумулятора – 35... 50 МПа. При этом предлагаемое пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой генерирует мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  более 15 кВт, а амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза не превышает 0,2 м.

### Выводы

1. Повышения эффективности работы тягачей с прицепными звеньями можно достичь за счет: оснащения автопоезда электронными системами мониторинга эксплуатационных параметров; увеличения полезной нагрузки и полной массы лесовозного автопоезда; уточнения ограничений на общий вес лесовозного автопоезда; сокращения времени нахождения автопоезда на погрузке леса; использования более совершенного способа определения объема и массы загружаемых на автопоезд лесоматериалов; обоснованного выбора мест и средств погрузки лесоматериалов на автопоезд; совершенствования конструкций тормозных механизмов и прицепных звеньев автопоезда; снижения нагруженности водителя тягача путем оптимального чередования его работы с отдыхом.

2. Предложено пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой для лесовозного тягача с прицепом-ропуском, использование которого дает возможность: уменьшить влияние динамических нагрузок, возникающих между звеньями автопоезда при его неустановившихся режимах движения; рекуперировать кинетическую энергию от масс звеньев с последующим использованием преобразованной и накопленной энергии рабочей жидкости в гидравлическом технологическом оборудовании лесовозного автопоезда; сократить расход топлива; повысить надежность рамы тягача и деталей коникового устройства; создать за счет повышения плавности хода автопоезда более комфортные условия для водителя.

3. Оптимальное плечо расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства при фиксированном плече расположения нижних точек крепления гидроцилиндров 0,35 м составляет 0,35...0,45 м, при этом обеспечивается средняя рекуперлируемая мощность более 13 кВт и амплитуда бокового смещения груза менее 0,27 м. Оптимальный диапазон давления рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора составляет 35...50 МПа, при этом рекуперлируемая устройством мощность превышает 12,2 кВт, а амплитуда бокового смещения груза равняется не более 0,29 м.

4. По результатам 2-факторной оптимизации наилучшее плечо расположения верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,37...0,58 м, давление рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора – 35...50 МПа. При этом предлагаемое пневмогидравлическое ре-

куперативное кониковое устройство с шаровой опорой генерирует мощность более 15 кВт, а амплитуда бокового смещения груженных лесоматериалов не превышает 0,2 м. Для поршневых пневмогидравлических аккумуляторов с максимальным давлением рабочей жидкости 35 МПа оптимальное плечо расположения верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,5 м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 279 с.

Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. *Planning an Experiment When Searching for Optimal Conditions*: 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).

2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.

Granovskij V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data during Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. (Leningrad Branch), 1990. 288 p. (In Russ.).

3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 270 с.

Mudrov A.E. *Numerical Methods for Personal Computers in the Basic, Fortran and Pascal Languages*. Tomsk, Rasko Publ., 1991. 270 p. (In Russ.).

4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 203 с.

Nikonov V.O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2021. 203 p. (In Russ.).

5. Посметьев В.И., Никонов В.О., Матяшов А.Е. Перспективные конструкции кониковых устройств лесовозных автопоездов с шаровой опорой и демпферным механизмом // Инновационные технологии на автомобильном транспорте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 22–27.

Posmetev V.I., Nikonov V.O., Matyashov A.E. Prospective Designs of Conical Devices of Logging Road Trains with Ball Joint and Damper Mechanism. *Innovatsionnye tekhnologii na avtomobil'nom transporte* = Innovative Technologies in Motor Transport: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2024, pp. 22–27. (In Russ.). [https://doi.org/10.58168/MOTOR2024\\_22-27](https://doi.org/10.58168/MOTOR2024_22-27)

6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В. Обоснование целесообразности оснащения лесовозных автопоездов рекуперативными тягово-сцепными устройствами по результатам имитационного моделирования. Воронеж: ВГЛТУ, 2023. 203 с.

Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. *Justification of the Feasibility of Equipping Timber Road Trains with Recuperative Towing Devices Based on the Results of Simulation Modeling*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2023. 203 p. (In Russ.).

7. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В. Повышение эффективности лесовозных автопоездов с помощью рекуперативных седельно-сцепных и поворотных кониковых устройств. Воронеж: ВГЛТУ, 2024. 282 с.

Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. *Improving the Efficiency of Timber Road Trains with Recuperative Fifth Wheel Couplings and Pivoting Cone Devices*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2024. 282 p. (In Russ.).

8. Allman M., Dudáková Z., Jankovský M., Merganič J. Operational Parameters of Logging Trucks Working in Mountainous Terrains of the Western Carpathians. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 6, art. no. 718. <https://doi.org/10.3390/f12060718>
9. Antilla P., Nummelin T., Väättäinen K., Laitila J., Ala-Ilomäki J., Kilpeläinen A. Effect of Vehicle Properties and Driving Environment on Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions of Timber Trucking Based on Data from Fleet Management System. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2022, vol. 15, art. no. 100671. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100671>
10. Brown M.W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight on Payload Efficiency: An Australian Case Study. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 7, art. no. 855. <https://doi.org/10.3390/f12070855>
11. Conrad IV J.L. Evaluating Profitability of Individual Timber Deliveries in the US South. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 4, art. no. 437. <https://doi.org/10.3390/f12040437>
12. Gao L., Wang D., Jin C., Yi T. Modelling and Performance Analysis of Cyclic Hydro-Pneumatic Energy Storage System Considering the Thermodynamic Characteristics. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 18, art. no. 6672. <https://doi.org/10.3390/en15186672>
13. Moskalik T., Tymendorf L., van der Saar J., Trzciński G. Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 16, art. no. 6028. <https://doi.org/10.3390/s22166028>
14. Muşat E.C., Abutnăriței G.L., Hogea D.D., Miu L.D., Avram V.N., Saicu S., Dercezi R.A. Loading Round Wood in Forestry Trucks and Forestry Platforms: A Case Study for Romania. *Forests*, 2024, vol. 15, no. 9, art. no. 1646. <https://doi.org/10.3390/f15091646>
15. Radzajewski P., Guzek M. Assessment of the Impact of Selected Parameters of Tractor-Semitrailer Set on the Braking Safety Indicators. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 9, art. no. 5336. <https://doi.org/10.3390/app13095336>
16. Salamah Y.B. Sliding Mode Controller for Autonomous Tractor-Trailer Vehicle Reverse Path Tracking. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 21, art. no. 11998. <https://doi.org/10.3390/app132111998>
17. Škvor P., Jankovský M., Natov P., Dvořák J., Zlatuška K. The Effect of Different Road Types on Timber Truck Drivers by Assessing the Load Environment of Drivers by Monitoring Changes in Muscle Tension. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 10, art. no. 1565. <https://doi.org/10.3390/f13101565>
18. Trzciński G., Tymendorf Ł. Multifactorial Analysis of the Axle Load of Truck Sets during the Transport of Sawmill By-Products. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 12, art. no. 1992. <https://doi.org/10.3390/f13121992>
19. Ziółkowski A., Fuć P., Lijewski P., Bednarek M., Jagielski A., Kusiak W., Igielka-Kalwat J. The Influence of the Type and Condition of Road Surfaces on the Exhaust Emissions and Fuel Consumption in the Transport of Timber. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 21, art. no. 7257. <https://doi.org/10.3390/en16217257>
20. Zuska A., Kurczyński D., Jackowski J.T. Study of Loads Acting on the Load during the Sudden Braking of a Vehicle. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 3, art. no. 1559. <https://doi.org/10.3390/app13031559>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest