

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>

УДК 630*31 : 169.113



Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом

Вадим О. Никонов¹✉, 8888nike8888@mail.ru 0000-0002-7380-9180

Валерий И. Посметьев¹, posmetyev@mail.ru 0000-0001-9878-7451

Владимир А. Зеликов¹, zelikov-vrn@mail.ru 0000-0003-2317-9413

Виктор В. Посметьев¹, victorvpo@mail.ru 0000-0001-6622-5358

Алексей С. Чуйков², offlex88@belstu.by 0000-0002-6923-7212

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

²Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

В данной статье решается проблема повышения эффективности функционирования лесовозных автопоездов в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Опыт эксплуатации автопоездов по таким лесовозным дорогам показывает, что на этих дорогах транспортно-эксплуатационные качества лесовозных автопоездов являются низкими. Обоснована актуальность научного направления, нацеленная на достижение топливной экономичности лесовозных автопоездов и повышение, таким образом, эффективности и конкурентоспособности лесозаготовительных предприятий. Представлен анализ работ зарубежных ученых, который позволил выделить существенные факторы, от которых во многом зависит эффективность процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Предложена перспективная конструкция сцепного устройства, позволяющая преобразовывать и полезно использовать кинетическую энергию массы прицепа с лесоматериалами, которая возникает в процессе движения автопоезда по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам в неустановившихся и переходных режимах движения. Исследование базировалось на математическом и имитационном моделировании, численных методах, а также современных методах получения и обработки информации при компьютерной поддержке. Разработаны математическая модель и компьютерная программа движения лесовозного автопоезда в изменяющихся дорожных условиях. Компьютерное моделирование позволило осуществить предварительную оценку работоспособности предлагаемого пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами за счет выявления и анализа зависимостей, характеризующих изменение исследуемых показателей эффективности от условий движения автопоезда и конструктивных параметров устройства. Установлено, что сцепное устройство в процессе движения лесовозного автопоезда в сложных дорожных условиях со скоростью 30 кмч⁻¹ дает возможность рекуперировать до 7 кВт, при этом, значение продольного ускорения прицепного звена относительно лесовозного автомобиля не превышает 0,83 м с⁻². Определено, что значение оптимального диаметра рекуперативного гидроцилиндра составляет 80-100 мм, а оптимального хода поршня 83-100 мм. При этом средняя мощность, рекуперированная устройством, составит не менее 7 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа составит не более 0,8 м с⁻². Выявлено, что разработанная система рекуперации остается эффективной в широком диапазоне высот неровностей 0,2-0,4 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,3-19,7 кВт соответственно при приемлемом значении среднего продольного ускорения 0,3-2,2 м с⁻². Полученные результаты будут использованы в качестве рекомендаций для конструкторов с целью доработки предлагаемого сцепного устройства на стадии проектирования.

Ключевые слова: оптимизация, картограмма, сцепное устройство, лесовозный автомобиль, рекуперативная мощность, прицеп, расход топлива, лесовозная дорога, эффективность, вывозка лесоматериалов

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 162–179. – Библиогр.: с. 176–178 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>.


Поступила 05.12.2022. *Пересмотрена* 04.03.2023. *Принята* 05.03.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023


Article


Optimization of the design parameters of the regenerative hitch installed in a logging vehicle with a trailer

Vadim O. Nikonov¹✉, 8888nike8888@mail.ru,  0000-0002-7380-9180

Valerii I. Posmetev¹, posmetyev@mail.ru,  0000-0001-9878-7451

Vladimir A. Zelikov¹, zelikov-vm@mail.ru,  0000-0003-2317-9413

Viktor V. Posmetev¹, victorvp@mail.ru,  0000-0001-6622-5358

Alexey S. Chuikov², offlex88@belstu.by,  0000-0002-6923-7212

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

²Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus

Abstract

This article solves the problem of increasing the efficiency of the functioning of logging road trains in conditions of insufficiently equipped logging roads. Experience in the operation of road trains on such logging roads shows that on these roads the transport and operational qualities of logging road trains are low. The relevance of the scientific direction, aimed at achieving the fuel efficiency of logging road trains and thus increasing the efficiency and competitiveness of logging enterprises, is substantiated. An analysis of the work of foreign scientists is presented, which made it possible to identify significant factors that largely determine the efficiency of the process of hauling timber by timber road trains. A promising design of the coupling device is proposed, which allows converting and usefully using the kinetic energy of the mass of the trailer with timber, which occurs during the movement of a road train along insufficiently equipped logging roads in unsteady and transient traffic modes. The study was based on mathematical and simulation modeling, numerical methods, as well as modern methods for obtaining and processing information with computer support. A mathematical model and a computer program for the movement of a timber road train under changing road conditions have been developed. Computer simulation made it possible to carry out a preliminary assessment of the performance of the proposed pneumohydraulic coupling device with recuperative and damper mechanisms by identifying and analyzing dependencies characterizing the change in the studied performance indicators on the driving conditions of the road train and the design parameters of the device. It has been established that the coupling device during the movement of a logging road train in difficult road conditions at a speed of 30 km/h makes it possible to recuperate up to 7 kW, while the value of the

longitudinal acceleration of the trailer link relative to the logging vehicle does not exceed 0.83 m/s^2 . It is determined that the value of the optimal diameter of the recuperative hydraulic cylinder is $80 \dots 100 \text{ mm}$, and the optimal piston stroke is $83 \dots 100 \text{ mm}$. In this case, the average power recuperated by the device will be at least 7 kW , and the average longitudinal acceleration of the trailer will be no more than 0.8 m/s^2 . It was found that the developed recuperation system remains effective in a wide range of roughness heights of $0.2 \dots 0.4 \text{ m}$, providing a recuperated power of $2.3 \dots 19.7 \text{ kW}$, respectively, with an acceptable average longitudinal acceleration of $0.3 \dots 2.2 \text{ m/s}^2$. The results obtained will be used as recommendations for designers to refine the proposed coupling device at the design stage.

Keywords: *optimization, cartogram, hitch, logging vehicle, regenerative power, trailer, fuel consumption, logging road, efficiency, timber hauling*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. A., Posmetev V. V., Chuikov A. S. (2023) Optimization of the design parameters of the regenerative hitch installed in a logging vehicle with a trailer. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*, Vol. 13, No. 1 (49), pp. 162-179 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>.

Received 05.12.2023 Revised 04.03.2023 Accepted 05.03.2023 Published online 15.05.2023

Введение

Транспорт играет огромную роль в функционировании лесной промышленности. Вопросы, связанные с вывозкой лесоматериалов лесовозными автопоездами очень важны для лесозаготовительных предприятий. Лесовозные автопоезда выполняют функцию связующего звена между лесозаготовительными предприятиями и потребителями лесоматериалов. Вывозка лесоматериалов является наиболее дорогостоящей частью процесса заготовки древесины, от которой зависит эффективность и развитие лесозаготовительных предприятий. Известно, что стоимость вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами может составлять почти половину конечной стоимости доставляемой потребителям древесины [1]. С целью повышения своей эффективности и конкурентоспособности, лесозаготовительные предприятия стараются снижать транспортные расходы. Расход топлива является одним из основных факторов увеличивающих транспортные расходы в сфере вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. До 35 % общих транспортных расходов связаны с потреблением топлива. Кроме этого, расход топлива лесовозными автопоездами при их движении по необустроенным лесовозным дорогам может на 70 % превышать расход топлива при движении по дорогам об-

щего пользования. Следовательно, поиск путей, направленных на достижение топливной экономичности лесовозными автопоездами и повышение, таким образом, конкурентоспособности лесозаготовительных предприятий, является актуальной задачей, что подтверждается результатами многих исследований зарубежных авторов, область научных интересов которых направлена на повышение эффективности лесовозного автомобильного транспорта, функционирующего в различных изменяющихся природно-климатических условиях [1].

Анализ результатов исследований научных работ зарубежных авторов позволил выявить перечень существенных факторов, от которых во многом зависит эффективность процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. К этим факторам относят: оптимальное соотношение самозагружающихся лесовозных автомобилей и прицепных звеньев [2-5]; синхронность процессов погрузки, разгрузки и вывозки лесоматериалов; равномерность распределения массы лесоматериалов по осям лесовозных автопоездов, полнота их загрузки [6-8]; изменение влажности и весовых характеристик различных пород лесоматериалов при их вывозке в разные сезоны года, характеризующиеся увеличением количества осадков и налипа-

нием снега; грузоподъемность, маневренность и устойчивость автопоездов [9-11]; протяженность, обустроенность и техническое состояние лесовозных дорог, величина продольного уклона дороги; погодные условия, доступность заезда к месту погрузки и разгрузки лесоматериалов; оптимальный выбор технологий и маршрутов вывозки лесоматериалов [12-14]; затрачиваемые эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и ремонт лесовозных автопоездов, запасные части для них, а также на топливо; квалификация водителей, использование для управления автопарком лесовозных автопоездов систем глобального позиционирования [15-16].

Перспективной областью научных исследований в настоящее время является разработка и практическое использование в транспортных средствах рекуперативных механизмов и устройств, позволяющих преобразовывать, накапливать и полезно использовать различные виды энергии. Кроме этого, использование рекуперативных и демпферных механизмов позволяет заметно снизить динамические нагрузки на узлы и детали, как тягача, так и прицепа, и тем самым повысить их надежность. Результаты исследований, проведенных ранее авторами, позволили разработать перспективную конструкцию тягово-сцепного устройства для лесовозного автомобиля с прицепом [20]. Такая конструкция позволяет преобразовывать и полезно использовать кинетическую энергию массы прицепа с лесоматериалами, которая возникает в процессе движения автопоезда по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам в неустановившихся и переходных режимах движения. Накопленная в пневмогидравлическом аккумуляторе энергия рабочей жидкости используется для осуществления погрузочно-разгрузочных работ гидравлическим манипулятором (рис. 1).

Цель работы достигается путем решения двух взаимосвязанных задач. Первая задача заключается в разработке математической модели функционирования пневмогидравлического сцепного устройства, при движении загруженного лесоматериалами лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозной дороге. Вторая задача заключается в оптимизации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства лесовозного

автомобиля с прицепом с помощью разработанной компьютерной программы

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объект исследования является процесс вывозки лесоматериалов лесовозным автомобилем с прицепом, оснащенный пневмогидравлическим сцепным устройством.

В качестве предмета исследования рассматриваются закономерности изменения показателей эффективности работы пневмогидравлического сцепного устройства от высоты неровностей опорной поверхности дороги и конструктивных параметров гидроцилиндра сцепного устройства.

Дизайн эксперимента или сбор данных

Для предварительного исследования работоспособности и эффективности предложенного пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами использовали математическое и компьютерное моделирование. Модель пневмогидравлического сцепного устройства должна позволить: оценить возможность рекуперации энергии рабочей жидкости, а также демпфирующие свойства тягово-сцепного устройства; определить показатели плавности хода автопоезда в различных дорожных условиях; определить оптимальные конструктивные параметры пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами; убедиться, что в широких диапазонах условий движения предлагаемое сцепное устройство остается работоспособным и достаточно эффективным [17-20].

Разработанная модель включает в себя: лесовозный автомобиль и прицеп, как отдельные тела, движущиеся в пространстве; взаимодействие лесовозного автомобиля и прицепа между собой с помощью предложенного пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами; взаимодействие лесовозного автомобиля и прицепа с опорной поверхностью лесовозной дороги через подвеску и колеса; неровную опорную поверхность, характерную для недостаточно обустроенной лесовозной дороги.

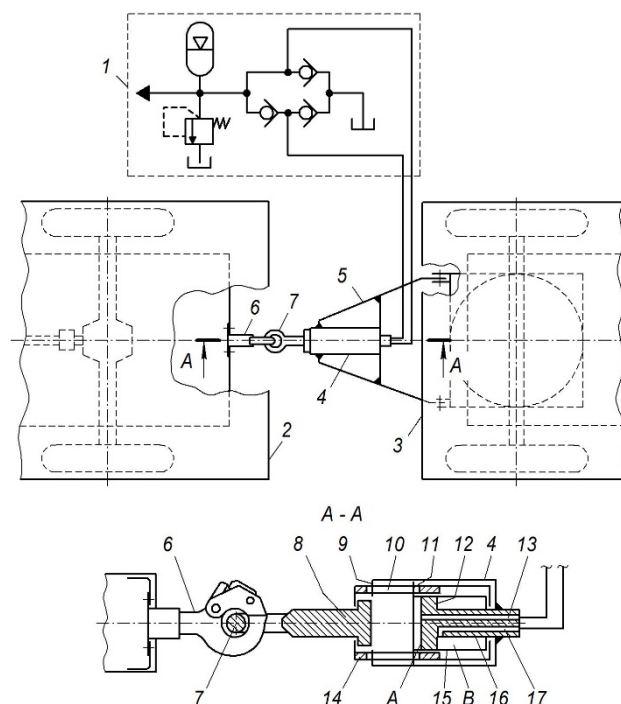


Рисунок 1. Схема пневмогидравлического сцепного устройства с демферным и амортизационным механизмами: *A, B* – поршневая и штоковая полости; *1* – рекуперативный гидропривод; *2* – лесовозный автомобиль; *3* – прицеп; *4* – корпус; *5* – дышло; *6* – крюк; *7* – присоединительная петля; *8* – фланец; *9, 11* – ограничители; *10* – сквозные пазы; *12* – поршень; *13, 17* – каналы; *14* – ограничитель подвижного цилиндра; *15* – гидроцилиндр двухстороннего действия; *16* – шток

Figure 1. Scheme of a pneumohydraulic coupling device with damper and shock-absorbing mechanisms: *A, B* – piston and rod cavities; *1* – recuperative hydraulic drive; *2* – logging vehicle; *3* – trailer; *4* – body; *5* – drawbar; *6* – hook; *7* – connecting loop; *8* – flange; *9, 11* – limiters; *10* – through grooves; *12* – piston; *13, 17* – channels; *14* – movable cylinder limiter; *15* – double-acting hydraulic cylinder; *16* – rod

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Отличительной особенностью данной работы является моделирование четырехосного лесовозного автомобиля и четырехосного прицепа. Для построения модели используются методы классической механики, обладающие высокой физической адекватностью и прогнозируемостью моделируемых объектов. В модели принято допущение, что лесовозный автомобиль и прицеп, за-

груженные лесоматериалами, являются абсолютно твердыми телами. Тела взаимодействуют с неровной опорной поверхностью лесовозной дороги в точках касания передних колес лесовозного автомобиля или сдвоенных колес (задние оси лесовозного автомобиля и все оси прицепа) в предположении об упруго-вязкой силовой зависимости (рис. 2).

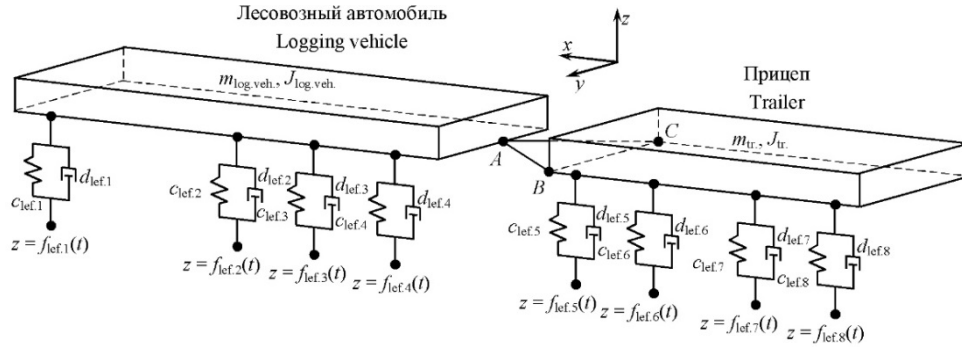


Рисунок 2. Расчетная схема лесовозного автомобиля с прицепом, используемая для создания динамической модели
 Figure 2. Calculation scheme of a logging vehicle with a trailer used to create a dynamic model
 Источник: собственная схема авторов
 Source: authors' ownschema

Поэтому для четырехосного лесовозного автомобиля и четырехосного прицепа рассматриваются по восемь точек касания с опорной поверхностью лесовозной дороги. Между собой лесовозный автомобиль и прицеп взаимодействуют посредством пневмогидравлического сцепного устройства *ABC*, которое предлагается оснастить демпферным и рекуперативным механизмами.

В математической модели задаются отдельно массы корпусов лесовозного автомобиля и прицепа $m_{log.veh.}$ и $m_{tr.}$. Моменты инерции тягача и прицепа $J_{tr.}$ и $J_{log.veh.}$ изменяются в зависимости от мгновенной оси вращения тела и их необходимо регулярно пере-

считывать в процессе моделирования. Основными переменными для составления уравнений динамики являются координаты положения в пространстве центров тяжести тягача ($x_{log.veh.}$, $y_{log.veh.}$, $z_{log.veh.}$) и прицепа ($x_{tr.}$, $y_{tr.}$, $z_{tr.}$), и их углы ориентации ($\varphi_{xlog.veh.}$, $\varphi_{ylog.veh.}$, $\varphi_{zlog.veh.}$), ($\varphi_{xtr.}$, $\varphi_{ytr.}$, $\varphi_{ztr.}$).

Для составления базовой системы уравнений, описывающей движение лесовозного автомобиля и прицепа используется второй закон Ньютона для поступательного движения и основное уравнение динамики вращательного движения. Системы уравнений составлены отдельно для лесовозного автомобиля и прицепа:

$$\left\{ \begin{aligned} m_{log.veh.} \frac{d^2 x_{log.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (F_{lef.i}^x + F_{rig.i}^x) + F_A^x; \\ m_{log.veh.} \frac{d^2 y_{log.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (F_{lef.i}^y + F_{rig.i}^y) + F_A^y; \\ m_{log.veh.} \frac{d^2 z_{log.veh.}}{dt^2} &= -m_{log.veh.} \cdot g + \sum_{i=1}^4 (F_{lef.i}^z + F_{rig.i}^z) + F_A^z; \\ J_{log.veh.x} \frac{d^2 \varphi_{xlog.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (M^x(F_{lef.i}) + M^x(F_{rig.i})) + M^x(F_A); \\ J_{log.veh.y} \frac{d^2 \varphi_{ylog.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (M^y(F_{lef.i}) + M^y(F_{rig.i})) + M^y(F_A); \\ J_{log.veh.z} \frac{d^2 \varphi_{zlog.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (M^z(F_{lef.i}) + M^z(F_{rig.i})) + M^z(F_A); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{tr.} \frac{d^2 x_{tr.}}{dt^2} = \sum_{i=5}^8 (F_{lef,i}^x + F_{rig,i}^x) + F_B^x + F_C^x; \\ m_{tr.} \frac{d^2 y_{tr.}}{dt^2} = \sum_{i=5}^8 (F_{lef,i}^y + F_{rig,i}^y) + F_B^y + F_C^y; \\ m_{tr.} \frac{d^2 z_{tr.}}{dt^2} = -m_{tr.} \cdot g + \sum_{i=5}^8 (F_{lef,i}^z + F_{rig,i}^z) + F_B^z + F_C^z; \\ J_{tr.x} \frac{d^2 \varphi_{xtr.}}{dt^2} = \sum_{i=5}^8 (M^x(F_{lef,i}) + M^x(F_{rig,i})) + M^x(F_B) + M^x(F_C); \\ J_{tr.y} \frac{d^2 \varphi_{ytr.}}{dt^2} = \sum_{i=5}^8 (M^y(F_{lef,i}) + M^y(F_{rig,i})) + M^y(F_B) + M^y(F_C); \\ J_{tr.z} \frac{d^2 \varphi_{ztr.}}{dt^2} = \sum_{i=5}^8 (M^z(F_{lef,i}) + M^z(F_{rig,i})) + M^z(F_B) + M^z(F_C); \end{array} \right. \quad (2)$$

где $F_{lef,i}$, $F_{rig,i}$ – силы, воспринимаемые колесами i -й оси лесовозного автомобиля с прицепом через их подвесу; t – время; F_A^x , F_A^y , F_A^z и F_{Bx} , F_{By} , F_{Bz} , F_{Cx} , F_{Cy} , F_{Cz} – составляющие сил, действующие от рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства на лесовозный автомобиль и прицеп; M^i – моменты соответствующих сил относительно оси i .

В первом приближении взаимодействие модельных лесовозного автомобиля и прицепа с моделируемой опорной поверхностью дороги принимается упруго-вязким:

$$F_i^z = c_i (z_{sur,i}(x_i, y_i) + R_{wh.} - z_{wh,i}) - d_i \left(\frac{\partial z_{sur,i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{wh,i}}{\partial t} \right), \quad (3)$$

где i – порядковый номер колеса лесовозного автомобиля или прицепа; $z_{sur,i}(x, y)$ – вертикальная координата опорной поверхности лесовозной дороги; $R_{wh.}$ – радиус колес прицепа и лесовозного автомобиля; $z_{wh,i}$ – вертикальная координата точки установки колеса на корпусе лесовозного автомобиля или прицепа; d_i , c_i – коэффициенты демпфирования и жесткости, характеризующие упруго-вязкое взаимодействие.

Для колес лесовозного автопоезда в математической модели кроме вертикальной составляющей, учитываются также и горизонтальные составляющие (поперечная и продольная) сил взаимодействия с опорной поверхностью лесовозной дороги.

Из-за разрывного характера функций связи тел в сцепном устройстве и сложных функций рельефа опорной поверхности лесовозной дороги базовая система уравнений, описывающая движе-

ние лесовозного автопоезда не имеет точного аналитического решения. Поэтому в данной работе базовая система дифференциальных уравнений решается численным методом Рунге-Кутты второго порядка. Используя данный метод, значения переменных x и скорости v_x определяются в соответствии со следующей зависимостью:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{\tau+1} = x_{\tau} + v_{x\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} = v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \Delta t, \end{array} \right. \quad (4)$$

где $v_{x\tau}$ и $v_{x\tau+1}$ – значения скоростей движения моделируемого лесовозного автомобиля; x_{τ} и $x_{\tau+1}$ – координаты движения моделируемого лесовозного автомобиля массой m вдоль декартового направления на различных шагах интегрирования по времени.

В результате циклического расчета заполняются таблицы текущих координат и угловых координат тел лесовозного автопоезда. Данные таблично заданные функции позволяют после окончания расчетов определить показатели эффективности предлагаемого пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами.

Для представления неровной опорной поверхности лесовозной дороги в математической модели используется метод комбинации неровностей (выступов) гауссовой формы.

Параметры гауссовых пиков – положение центра, высота, полуширина – выбираются случайным путем с помощью генератора случайных чисел. Перечисленные параметры в математической

модели представляют собой случайные функции с равномерным законом распределения с широкими диапазонами изменения. При представлении опорной поверхности лесовозной дороги необходимо моделировать как малые объекты с протяженностью 0,2 м, так и большие объекты (холмы) с протяженностью порядка 5 м.

Функция $z(x, y)$ рельефа опорной поверхности от координат точки контакта колеса лесовозного автопоезда с поверхностью (x, y) задавалась, как сумма гауссовых функций, учитывающая количество неровностей N_B на лесовозной дороге, положение центра неровности (x_i, y_i) , ее высоты H_i и полуширины σ_i .

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^{N_B} H_i \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (5)$$

Перед началом компьютерного эксперимента помещали заданное количество гауссовых неровностей на контрольный участок лесовозной дороги размерами 500 м на 5 м с помощью генератора случайных чисел. Интервал случайного выбора высоты H_i неровности составлял $[0, 0,1]$, а полуширины $\sigma_i - [0,05, 0,15]$. Статистические характеристики гауссовых неровностей определялись по соответствующим таблицам для лесовозных дорог различной обустроенности.

В математической модели пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами представлено эквивалентной схемой с гидроцилиндром двухстороннего действия с упорами поршня в крайних левом и правом положениях. Изменение расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом приводит к движению поршня в гидроцилиндре и возникновению соответствующих сил сопротивления изменению расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом. Рекуперативный эффект достигается за счет вытеснения рабочей жидкости из полостей A или B гидроцилиндра сцепного устройства в пневмогидравлический аккумулятор для последующего ее использования.

С точки зрения геометрии модели, рекуперативное устройство находится в треугольнике ABC (рис. 2), образованном двумя невесомыми тягами AB и AC .

Сцепное устройство приводится в действие между лесовозным автомобилем и прицепом за счет тяг в упруго-вязком приближении. Изменение длин тяг приводит в модели к движению поршня в гидроцилиндре и соответствующему насосному эффекту. Перед началом движения лесовозного автопоезда или в процессе движения с приблизительно постоянной скоростью поршень расположен в крайнем левом положении. При этом полость B гидравлического цилиндра устройства заполнена рабочей жидкостью. В процессе движения лесовозного автомобиля с прицепом с ускорением происходит перемещение поршня в крайнее правое положение, вытеснение рабочей жидкости из полости B и закачивание рабочей жидкости в полость A . При торможении (замедлении) лесовозного автопоезда происходит вытеснение рабочей жидкости из полости A в пневмогидравлический аккумулятор и заполнение рабочей жидкостью полости B (рис. 1).

Цикл работы пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами многократно повторяется по мере движения лесовозного автопоезда.

Изменение конструкции тягово-сцепного устройства может ухудшить плавность хода лесовозного автопоезда. Изменение демпфирующих свойств тягово-сцепного устройства путем установки рекуперативного гидроцилиндра может повлечь резкие ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля. Для контроля плавности хода использовали такой показатель эффективности, как среднее ускорение прицепа в продольном направлении. Отсчет ведется по отношению к неподвижной системе координат.

Обычно показатели эффективности определенного объекта отражают производительность объекта и качество его работы. В данном случае в качестве показателей эффективности пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами выбраны рекуперлируемая мощность N_{rec} и плавность хода, количественно выражаемая переменной продольным ускорением прицепа $a_{пр}$.

Рекуперлируемая мощность в данный момент времени t рассчитывалась в математической модели по формуле



Рисунок 4. Входные и выходные переменные математической модели

Figure 4. Input and output variables of the mathematical model

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Входные переменные образуют две группы. К первой группе относятся геометрические параметры гидроцилиндра рекуперативного устройства: $D_{hydr.cyl.}$ – внутренний диаметр рекуперативного гидроцилиндра; $L_{hydr.cyl.}$ – максимальное перемещение поршня (ход) в рекуперативном гидроцилиндре. Ко второй группе: v – продольная скорость движения лесовозного автомобиля с прицепом; $h_{av.}$ – среднее значение высоты неровностей опорной поверхности. Выходными переменными математической модели являются: $N_{rec.av.}$ – средняя рекуперированная мощность; $a_{tr.av.}$ – среднее продольное ускорение прицепа относительно лесовозного автомобиля.

Результаты и обсуждения

Одной из задач дальнейшего теоретического исследования является оптимизация параметров пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами $D_{hydr.cyl.}$, $L_{hydr.cyl.}$. Также важной задачей теоретического исследования является оценка влияния условий движения лесовозного автопоезда (скорости движения v и средней высоты неровностей $h_{av.}$ лесовозной дороги) на работоспособность и эффективность разработанного пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами. Первичная проверка модели проведена для наиболее типичного набора

входных параметров. В ходе первичной проверки оценивали работоспособность нового пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами.

На начальном этапе проведения компьютерных экспериментов выполнялась подготовка функций $z(x)$ высоты опорной поверхности: как для колес левого, так и правого борта лесовозного автопоезда. В нулевой момент времени компьютерного эксперимента модельные лесовозный автомобиль и прицеп помещались на высоте 1 м над опорной поверхностью лесовозной дороги. За первые 3 ... 4 секунды модельного времени лесовозный автопоезд опускается на опорную поверхность, совершает колебания во всех декартовых и угловых направлениях и практически приходят в состояние динамического равновесия.

Скорость v_x движения лесовозного автомобиля выдерживалась неизменной и составляла 30 км/ч. Скорость прицепа в модели не задавалась искусственно, а определялась путем решения дифференциальных уравнений движения. Такой подход позволил рассчитывать ускорение прицепа и оценивать плавность его хода.

Полученный в процессе компьютерного эксперимента график зависимости мгновенной рекуперированной мощности от времени отражает многократные циклические срабатывания пневмо-

гидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами (рис. 5, а).

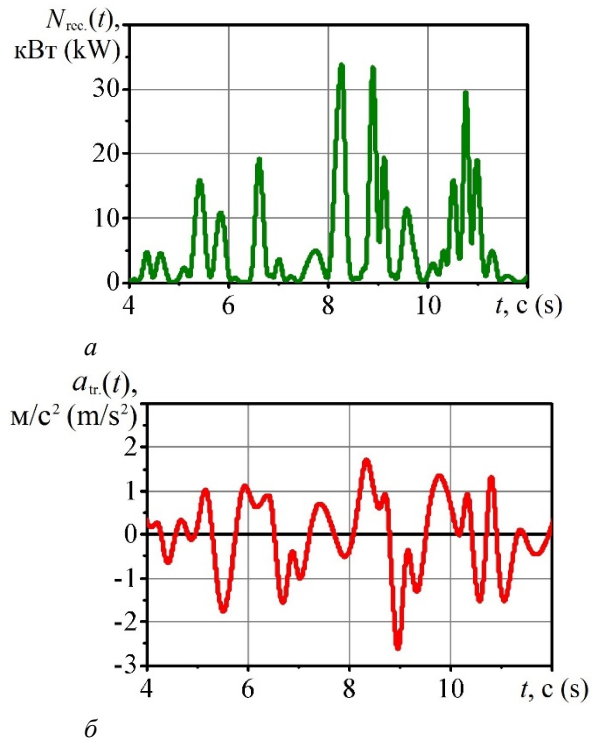


Рисунок 5. Зависимости изменения с течением времени t значений рекуперированной мощности N_{rec} . (а) и продольного ускорения прицепа a_{tr} . (б) относительно лесовозного автомобиля

Figure 5. Dependences of change over time t of the values of the recuperated power N_{rec} . (а) and longitudinal acceleration of the trailer a_{tr} . (б) in relation to a logging vehicle

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Локальные максимумы функции $N_{rec}(t)$ могут достигать 11 ... 34 кВт. Однако усредненная по времени рекуперированная мощность составила около 7 кВт. Ускорение прицепа a_{tr} в направлении оси OX (рис. 5, б) количественно характеризует плавность хода, под которой понимается уровень равномерности движения прицепа. Амплитуда колебаний ускорения прицепа составляют 0,9 ... 2,6 m/c^2 . Однако усредненное по времени продольное ускорение составляет значительно меньшую величину 0,83 m/c^2 .

Таким образом, первичная проверка модели показала, что пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным ме-

ханизмами позволяет при движении автопоезда в заданных дорожных условиях со скоростью 30 км/ч рекуперировать в среднем около 7,0 кВт мощности, при среднем продольном ускорении прицепа, равное примерно 0,83 m/c^2 .

Определение оптимальной комбинации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами представляет собой задачу многофакторной оптимизации. В данной работе задача оптимизации упрощена до двух факторной: необходимо найти оптимальную комбинацию геометрических параметров рекуперативного устройства – диаметра гидроцилиндра $D_{hydr.cyl.}$ и хода поршня $L_{hydr.cyl.}$, при которых будет максимальной величина рекуперированной мощности $N_{rec.av.}$ и минимальное среднее ускорение прицепа $a_{tr.av.}$ относительно лесовозного автомобиля:

$$\begin{cases} N_{rec.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) \rightarrow \max; \\ a_{tr.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (10)$$

Для решения задачи оптимизации провели серию из девяти компьютерных экспериментов, в ходе которых изменяли $D_{hydr.cyl.}$ на уровнях 80, 100, 120 мм, и $L_{hydr.cyl.}$ на уровнях 60, 80, 100 мм. Полученные в результате компьютерных экспериментов показатели эффективности представлены в табл. 1.

На основе приведенного набора данных получены полиномиальные формулы путем аппроксимации методом наименьших квадратов в программе MathCAD 14:

$$\begin{aligned} N_{rec.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) = & -5,542 \cdot 10^{-4} D_{hydr.cyl.}^2 - \\ & - 8,792 \cdot 10^{-4} L_{hydr.cyl.}^2 - 3,125 \cdot 10^{-4} D_{hydr.cyl.} \cdot L_{hydr.cyl.} + \\ & + 0,11 D_{hydr.cyl.} + 0,229 L_{hydr.cyl.} - 10,9; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} a_{tr.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) = & - 4,97 \cdot 10^{-5} L_{hydr.cyl.}^2 - \\ & - 2,487 \cdot 10^{-5} D_{hydr.cyl.} \cdot L_{hydr.cyl.} + 9,98 \cdot 10^{-3} D_{hydr.cyl.} + \\ & + 5,02 \cdot 10^{-3} L_{hydr.cyl.} - 0,051, \end{aligned} \quad (12)$$

где $N_{rec.av}$ – рекуперированная мощность, создаваемая сцепным устройством, кВт; $a_{tr.av.}$ – продольно ускорение прицепа относительно лесовозного автомобиля, m/c^2 ; $D_{hydr.cyl.}$ – диаметр гидроцилиндра, мм; $L_{hydr.cyl.}$ – ход поршня, мм.

Результаты компьютерных экспериментов, с целью оценки влияния параметров рекуперированного и демпфирующего механизмов на их эффективность

Table 1

The results of computer experiments in order to assess the influence of the parameters of the recuperated and damping mechanisms on their effectiveness

| Номер компьютерного эксперимента Computer experiment number | Исследуемые параметры Researched parameters | | | |
|--|--|----------------------------|---------------------------|--|
| | $D_{hydr.cyl.}$ мм (mm) | $L_{hydr.cyl.}$ мм (mm) | $N_{rec.av.}$ кВт (kW) | $a_{tr.av.}$ м/с ² (m/s ²) |
| 1 | 80 | 60 | 4,83 | 0,75 |
| 2 | 80 | 80 | 6,87 | 0,67 |
| 3 | 80 | 100 | 8,20 | 0,55 |
| 4 | 100 | 60 | 4,91 | 0,92 |
| 5 | 100 | 80 | 7,02 | 0,83 |
| 6 | 100 | 100 | 8,45 | 0,70 |
| 7 | 120 | 60 | 4,73 | 1,09 |
| 8 | 120 | 80 | 6,75 | 0,99 |
| 9 | 120 | 100 | 8,05 | 0,85 |

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Вышеприведенные зависимости позволяют осуществить быструю оценку исследуемых показателей эффективности работы сцепного устройства лесовозного автопоезда. Для визуального анализа полученные функции построены в виде трехмерных графиков (рис. 6) и картограмм оптимизации (рис. 7). Графики позволяют в наглядной форме осуществить оценку исследуемых показателей эффективности предлагаемого сцепного устройства при изменении диаметра гидроцилиндра $D_{hydr.cyl.}$ и хода поршня $L_{hydr.cyl.}$

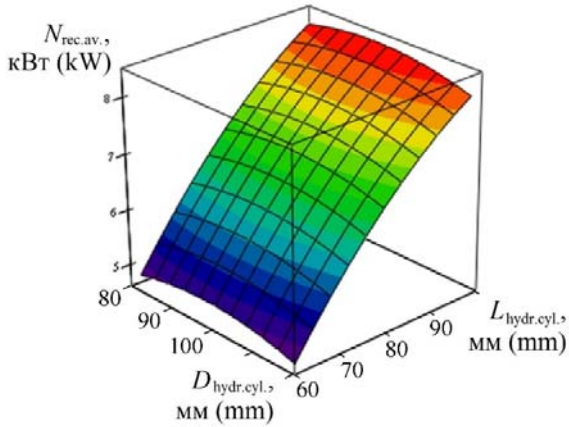
Картограммы оптимизации (рис. 7) являются изображением «вида сверху» трехмерных графиков, поверхность которых представляется линиями уровня. Пример использования картограммы оптимизации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами приведен на рисунке 7, а. В случае если диаметр гидроцилиндра составляет 90 мм (точка А) и ход поршня составляет 80 мм (точка В), то рекуперированная мощность составляет около 7 кВт. Затемненные области, приведенные на картограммах,

характеризуют наиболее благоприятные значения исследуемых показателей эффективности.

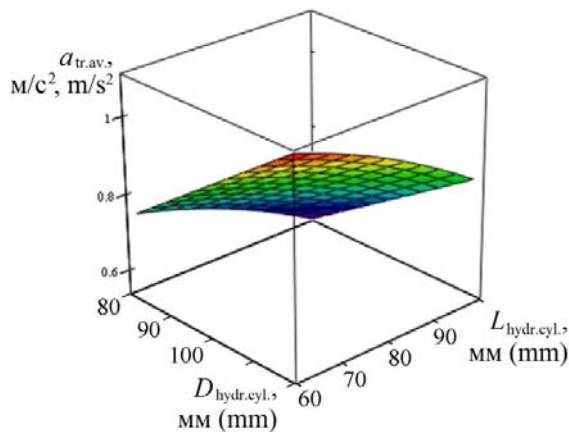
Пороговыми уровнями в процессе разделения на благоприятную и неблагоприятную области выбраны 7 кВт (рис. 10, а) и 0,8 м/с² (рис. 7, б). При этом учитывалось, что характерной особенностью наиболее благоприятной области должно являться занимаемая ею протяженная доля факторного пространства. Эта благоприятная область должна включать в себя максимальные и минимальные значения критериев, а ее граница должна быть привязана к линии уровня. Место пересечения благоприятных областей (рис. 7, в) изображает общую оптимальную область, которая одновременно включает в себя максимальную рекуперированную мощность и минимальное ускорение прицепа.

По расположению оптимальной области на картограмме можно заключить, что значение оптимального диаметра рекуперативного гидроцилиндра сцепного устройства составляет 80 ... 100 мм, оптимальный ход поршня 83 ... 100 мм. При этом средняя мощность, рекуперированная сцепным устройством, составит не менее 7 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа составит не более 0,8 м/с². Кроме этого, существенное

влияние на показатели эффективности предлагаемого сцепного устройства также оказывает высота неровностей h_{sur} , имеющихся на опорной поверхности лесовозной дороги. С целью определения зависимостей влияния высоты неровностей опорной поверхности на исследуемые показатели эффективности проведена серия компьютерных экспериментов, в ходе которых значение высоты неровностей h_{sur} изменяли в диапазоне от 0,1 до 0,5 м с шагом 0,1 м.



a

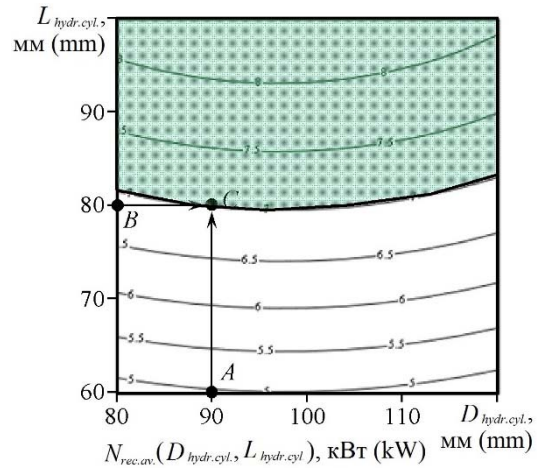


б

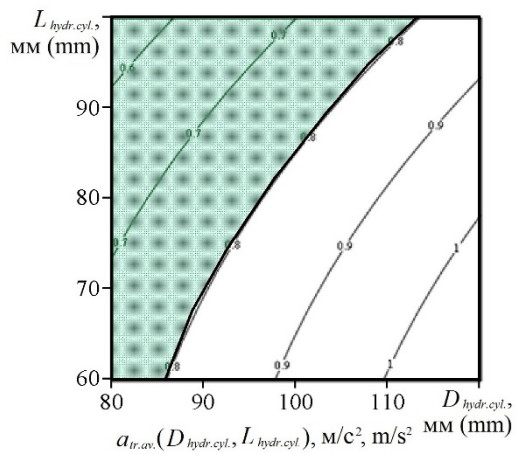
Рисунок 6. Графики влияния диаметра $D_{hydr.cyl.}$ гидроцилиндра и хода поршня $L_{hydr.cyl.}$ на изменение значений рекуперированной мощности $N_{rec.av.}$ (a) и ускорений прицепа $a_{tr.av.}$ (б) относительно лесовозного автомобиля

Figure 6. Graphs of the influence of the diameter $D_{hydr.cyl.}$ hydraulic cylinder and piston stroke $L_{hydr.cyl.}$ to change the values of the recuperated power $N_{rec.av.}$ (a) and trailer accelerations $a_{tr.av.}$ (b) in relation to the logging vehicle

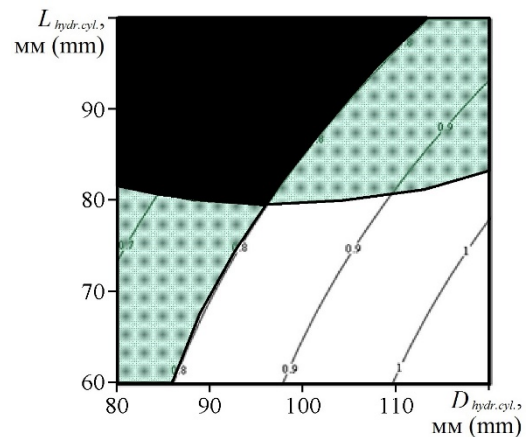
Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations



a



б



в

Рисунок 7. Картограммы оптимизации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства

Figure 7. Optimization cartograms design parameters of the pneumohydraulic coupling device

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Анализ данных

На рис. 8 помимо точек, полученных в результате компьютерного эксперимента, приведены зеленые сплошные кривые, представляющие собой результат аппроксимации методом наименьших квадратов полиномом второго порядка, красные штриховые линии – границы доверительного интервала (confidenceband) со статистической достоверностью 0,95, пунктирные синие линии – границы интервала прогнозирования (predictionband) со статистической надежностью 0,95.

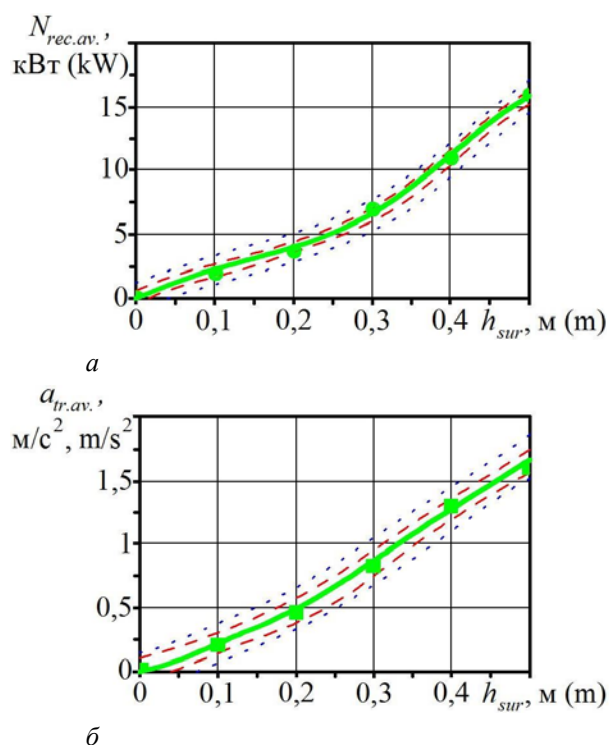


Рисунок 8. Зависимости изменения значений recuperated power и продольного ускорения при увеличении высоты неровностей h_{sur} опорной поверхности лесовозной дороги

Figure 8. Dependences of the change in the values of the recuperated power and the longitudinal acceleration with an increase in the height of the irregularities h_{sur} supporting surface of the logging road

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Обнаружено, что увеличение средней высоты неровностей h_{sur} опорной поверхности лесовозной дороги приводит к увеличению средней

рекуперированной мощности $N_{rec.av.}$ практически по квадратичному закону (рис. 8, а). Увеличение среднего продольного ускорения $a_{tr.av.}$ происходит так же, по практически квадратичному закону, однако до высоты неровностей h_{sur} опорной поверхности лесовозной дороги, равной 0,4 м, после этого темп роста продольного ускорения $a_{tr.av.}$ замедляется (рис. 8, б).

Таким образом, разработанное пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами остается эффективным в широком диапазоне высот неровностей 0,1 ... 0,5 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,2 ... 16,1 кВт при приемлемых значениях ускорения прицепа соответственно 0,22 ... 1,58 м/с².

Выводы

Анализ работ зарубежных ученых позволил выявить основные факторы, от которых зависит эффективность вывозки лесоматериалов лесовозными автомобилями с прицепами. С целью повышения эффективности процесса вывозки лесоматериалов, авторами была предложена перспективная конструкция сцепного устройства, позволяющая преобразовывать и полезно использовать кинетическую энергию массы прицепа с лесоматериалами, которая возникает в процессе движения автопоезда по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам в неустановившихся и переходных режимах движения. Накопленная в пневмогидравлическом аккумуляторе энергия рабочей жидкости используется для осуществления погрузочно-разгрузочных работ гидравлическим манипулятором.

Разработаны математическая модель и компьютерная программа движения лесовозного автопоезда в изменяющихся дорожных условиях. Компьютерное моделирование позволило осуществить предварительную оценку работоспособности предлагаемого пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами за счет выявления и анализа зависимостей, характеризующих изменение исследуемых показателей эффективности от условий движения автопоезда и конструктивных параметров устройства.

Установлено, что сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами при движении четырехосных лесовозного автомобиля и при-

цепы в сложных дорожных условиях со скоростью 30 км/ч дает возможность рекуперировать до 7 кВт, при этом, значение продольного ускорения прицепного звена относительно лесовозного автомобиля не превышает 0,83 м/с².

Оптимальный рабочий диаметр рекуперативного гидроцилиндра составляет 80 ... 100 мм, оптимальный ход поршня 83 ... 100 мм. При этом средняя мощность, рекуперированная устройством, составит не менее 7,0 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа составит не более 0,8 м/с². Разработанная система рекуперации остается эффективной в широком диапазоне высот неровностей

0,2 ... 0,4 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,3 ... 19,7 кВт соответственно при приемлемом значении среднего продольного ускорения 0,3 ... 2,2 м/с.

Разработанное пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами остается эффективным в широком диапазоне высот неровностей 0,1 ... 0,5 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,2 ... 16,1 кВт при незначительных значениях ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля – 0,22 ... 1,58 м/с².

Список литературы

1. Никонов, В. О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта : монография / В. О. Никонов ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2021. – 203 с. – *Библиогр.* : с. 181-202 (196 назв.). Режим доступа : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45694525>
2. Akay A. E. Determination of the Safest Route for Logging Trucks Based on Road Types and Conditions / A. E. Akay // *Environ. Sci. Proc.* 2021 3 5. *Библиогр.* : p. 6 (12 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/IECF2020-08068>
3. Akay A. E. Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products / A. E. Akay, H. Serin, J. Sessions, E. Bilici, M. Pak // *Croat. J. For. Eng.* 42 (2021) 2 pp. 245-258. – *Библиогр.* : pp. 257-258 (20 titles). – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.851>
4. Allman M. Operational Parameters of Logging Trucks Working in Mountainous Terrains of the western Carpathians / M. Allman, Z. Dudakova, M. Jankovsky, J. Merganic // *Forests.* 2021, 12, 718 – 13 p. – *Библиогр.* : pp. 12-13 (27 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f12060718>
5. Alrejilal A. Impact of crosswinds and truck weight on rollover propensity when negotiating combined curves / A. Alrejilal, K. Ksaibati // *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022. *Библиогр.* : pp. 16-17 (52 titles). – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.01.001>
6. Anttila P. The effect of winter weather on timber truck tare weights / P. Anttila, T. Nummelin, K. Väätäinen, J. Laitila // *Silva Fennica*, 2020, vol. 54 no. 4 article id 10385. 16 p. – *Библиогр.* : pp. 14-16. (24 titles). – DOI: <http://doi.org/10.14214/sf.10385>
7. Brown M. W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight On Payload Efficiency : An Australian Case Study / M. W. Brown // *Forests* 2021, 12, 855. – 11 p. – *Библиогр.* : pp. 11 (24 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f12070855>
8. Chevalier P. Cost Analysis of Weyerhaeuser is Pembina Timberlands Log Haul / P. Chevalier // *Faculty of natural resources management Lakehead University*, April 6, 2018. – 54 p. – *Библиогр.* : pp. 31-32 (23 titles).
9. J. L. Conrad I. V. Costs and Challenges of Log Truck Transportation in Georgia, USA / J. L. Conrad I. V. // *Forests* 2018, 9, 650 – 14 p. – *Библиогр.* : pp. 12-14 (31 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f9100650>
10. Kogler C. Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain / C. Kogler, A. Stenitzer, P. Rauch // *Forests* 2020, 11, 1245 15 p. – *Библиогр.* : pp. 14-15 (27 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f11121245>
11. Kozakiewicz P. Importance of the Moisture Content of Large-Sized Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Round wood in its Road Transport / P. Kozakiewicz, L. Tymendorf, G. Trzcinski // *Forests* 2021, 12, 879 13 p. – *Библиогр.* : pp. 12-13 (36 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f122070879>

12. Moreno G. Stability of Heavy Articulated Vehicles : Effect of Load Distribution / G. Moreno, V. Manenti, G. Guerero, L. Nicolazzi, R. Vieira, D. Martins // *Transportation Research Procedia* 33 (2018) 211-218. *Bibliogr.* : p. 218 (19 titles). – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>
13. Palander T. Improving Energy Efficiency in a Synchronized Road – Transportation System by Using a TFMC (Transportation Fleet – Management Control) in Finland / T. Palander, K. Karha // *Energies* 2019, 12, 670. – 15 p. – *Bibliogr.* : pp. 14-15 (57 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/en12040670>
14. Pandur Z. Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Milly and Mountainous Forest Roads / Z. Pandur, H. Neveceral, M. Susnjar, M. Bacic, K. Lepoglavec // *Forestist* 2021. – *Bibliogr.* : pp. 9-10 (31 titles). – DOI: <http://doi.org/10.5152/forestist.2021.21012>
15. Trzcinski G. Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo / G. Trzcinski, T. Moskalik, R. Wojtan // *Forests* 2018 9 164 12 p. – *Bibliogr.* : pp. 10-12 (40 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f9040164>
16. Vaatainen K. Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden / K. Vaatainen, P. Anttila, L. Elisson, J. Routa // *Croat. J. For. Eng.* 42 (2021) 1 pp. 39-61. – *Bibliogr.* : pp. 54-61 (190 titles). – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfc.2021.803>
17. Посметьев, В. И. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-цепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // *Лесной журнал*. 2019, № 4. – С. 108-123. – *Библиогр.* : с. 120-123 (20 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>
18. Никонов, В. О. Рекуперация гидравлической энергии в тягово-цепном устройстве лесовозного автомобиля с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, К. А. Яковлев // *Лесотехнический журнал*. – 2018. – № 4. – С. 230-239. – *Библиогр.* : с. 238-239 (10 назв.). – DOI: http://doi.org/10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845
19. Посметьев, В. И. Имитационная модель оценки эффективности лесовозного автопоезда, оснащенного рекуперативным пневмогидравлическим тягово-цепным устройством / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, И. В. Сизьмин // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10. – № 4 (40). – С. 181-196. – *Библиогр.* : с. 193-196 (20 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>
20. Посметьев, В. И. Повышение эффективности лесовозного автопоезда путем использования рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, И. В. Сизьмин // *Воронежский научно-технический вестник*. – 2021. – Т. 4, № 4 (38). – С. 70-85. – *Библиогр.* : с. 81-85 (28 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-70-85>

References

1. Nikonov V. O. *Sovremennoe sostoyanie, problemi i puti povsheniya effektivnosti lesovoznogo avtomobilnogo transporta* [Current state, problems and ways to improve the efficiency of timber road transport]. Monography ; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "VGLTU". – Voronezh, 2021. – 203 p. (In Russ.). Available at : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45694525>
2. Akay A. E. Determination of the Safest Route for Logging Trucks Based on Road Types and Conditions, *Environ. Sci. Proc.* 2021 3 5. DOI: <http://doi.org/10.3390/IECF2020-08068>
3. Akay A. E., Serin H., Sessions J., Bilici E., Pak M. Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products. *Croat. J. For. Eng.* 42 (2021) 2 pp. 245-258. DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.851>
4. Allman M., Dudakova Z., Jankovsky M., Merganic J. Operational Parameters of Logging Trucks Working in Mountainous Terrains of the western Carpathians. *Forests* 2021, 12, 718 – 13 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f12060718>
5. Alrejjal A., Ksaibati K. Impact of crosswinds and truck weight on rollover propensity when negotiating combined curves, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.01.001>

6. Anttila P., Nummelin T., Väättäin K., Laitila J. The effect of winter weather on timber truck tare weights. *Silva Fennica* vol. 54 no. 4 article id 10385. 16 p. DOI: <http://doi.org/10.14214/sf.10385>
7. Brown M. W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight On Payload Efficiency : An Australian Case Study. *Forests* 2021, 12, 855. – 11 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f12070855>
8. Chevalier P. Cost Analysis of Weyerhaeuser is Pembina Timberlands Log Haul. Faculty of natural resources management Lakehead University, April 6, 2018. – 54 p.
9. J. L. Conrad I. V. Costs and Challenges of Log Truck Transportation in Georgia, USA. *Forests* 2018, 9, 650 – 14 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f9100650>
10. Kogler C., Stenitzer A., Rauch P. Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests* 2020, 11, 1245 15 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f11121245>
11. Kozakiewicz P., Tymendorf L., Trzcinski G. Importance of the Moisture Content of Large-Sized Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Round wood in its Road Transport. *Forests* 2021, 12, 879 13 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f122070879>
12. Moreno G., Manenti V., Guerero G., Nicolazzi L., Vieira R., Martins D. Stability of Heavy Articulated Vehicles : Effect of Load Distribution, *Transportation Research Procedia* 33 (2018) 211-218. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>
13. Palander T., Karha K. Improving Energy Efficiency in a Synchronized Road – Transportation System by Using a TFMC (Transportation Fleet – Management Control) in Finland. *Energies* 2019, 12, 670, 15 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/en12040670>
14. Pandur Z., Neveceral H., Susnjar M., Bacic M., Lepoglavec K. Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Milly and Mountainous Forest Roads. *Forestist* 2021. DOI: <http://doi.org/10.5152/forestist.2021.21012>
15. Trzcinski G., Moskalik T., Wojtan R. Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo. *Forests* 2018 9 164 12 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f9040164>
16. Vaatainen K., Anttila P., Elisson L., Routa J. Roundwood and Biomass Logistics in Finland and. *Croat. j. for. eng.* 42 (2021) 1 pp. 39-61. DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfc.2021.803>
17. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer // *Lesnoy Zhurnal* (Russian forestry journal), 2019, № 4. – pp. 108-123. DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>
18. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Yakovlev K. A. *Rekuperaciya gidravlicheskoj energii v tyagovo_scepnom ustroistve lesovoznogo avtomobilya s pricepom* [Recovery of hydraulic energy in the towing hitch of a timber truck with a trailer]. *Forestry journal*. – 2018. – № 4. – P. 230-239. DOI: http://doi.org/10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845. (In Russ.).
19. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Sizmin I. V. *Imitacionnaya model ocenki effektivnosti lesovoznogo avtopoezda, osnaschennogo rekuperativnim pnevmogidravlicheskim tyagovo-scepnim ustroistvom* [Simulation model for evaluating the efficiency of a timber road train equipped with a recuperative pneumohydraulic towing device]. *Forestry journal*. – 2020. – T. 10. – № 4 (40). – S. 181-196. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>. (In Russ.).
20. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Sizmin I. V. *Povishenie effektivnosti lesovoznogo avtopoezda putem ispolzovaniya rekuperativnogo pnevmogidravlicheskoj scepnogo ustroistva* [Increasing the efficiency of a timber road train by using a recuperative pneumohydraulic coupling device]. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2021. – T. 4, № 4 (38). – S. 70-85. DOI: <http://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-70-85>

Сведения об авторах

✉ *Никонов Вадим Олегович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

Information about the authors

✉ *Nikonov Vadim Olegovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetyev Valerii Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Zelikov Vladimir Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Posmetyev Viktor Valerevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Chuikov Alexey Sergeevich – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a, Sverdlov str., Minsk, 220006, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

✉ – Для контактов/Corresponding author