

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8>

УДК 169.113



## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЛЕСОВОЗНОГО АВТОПОЕЗДА ПРИ ВЫВОЗКЕ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОМ СЕДЕЛЬНО-СЦЕПНОМ УСТРОЙСТВЕ

Валерий И. Посметьев<sup>1</sup>, posmetyev@mail.ru 0000-0001-9878-7451

Владимир А. Зеликов<sup>1</sup>, zelikov-vrn@mail.ru 0000-0003-2317-9413

Вадим О. Никонов<sup>1</sup> ✉, 8888nike8888@mail.ru 0000-0002-7380-9180

Виктор В. Посметьев<sup>1</sup>, victorvpo@mail.ru 0000-0001-6622-5358

Алексей С. Чуйков<sup>2</sup>, offlex88@belstu.by 0000-0002-6923-7212

Александр В. Авдюхин<sup>1</sup>, 1988aav@mail.ru 0000-0003-2622-8946

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

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

Обоснована необходимость повышения эффективности лесовозных автопоездов, путем снижения транспортных расходов, затрачиваемых при вывозке лесоматериалов в существующих дорожных и природно-климатических условиях. Представлен обзор научных исследований зарубежных ученых, позволивший выявить наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на транспортные расходы. Предложена перспективная конструкция рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства, позволяющая сократить транспортные расходы за счет снижения количества используемого автопоездом топлива, повысить надежность лесовозного автопоезда путем уменьшения динамических нагрузок, возникающих между его звеньями при движении по неровностям поверхности лесовозной дороги. Усовершенствована математическая модель движения по неровностям лесовозной дороги лесовозного тягача с полуприцепом, оборудованного предлагаемым сцепным устройством, в условиях частых ускорений и торможений, позволяющая выполнить предварительную оценку рекуперации энергии предлагаемым устройством в различных режимах переходных процессах, а также исследовать влияние основных параметров рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства на показатели его эффективности. Разработаны две компьютерные программы для исследования показателей эффективности функционирования рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства при различных переходных режимах движения лесовозного автопоезда с заданными параметрами неровностей лесовозной дороги. Установлено, что использование предлагаемого сцепного устройства в лесовозном автопоезде дает возможность при движении со случайно повторяющимися замедлениями и ускорениями рекуперировать мощность до 6,5 кВт, а также достигать значения продольного ускорения полуприцепа относительно тягача 0,72 м/с<sup>2</sup>. Компьютерное моделирование позволило установить значение оптимального диаметра гидравлического цилиндра, обеспечивающего наибольшее значение рекуперированной мощности при наименьшем значении ускорения полуприцепа относительно тягача.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, эксперимент, рекуперация, седельно-сцепное устройство, лесовозный автопоезд, лесовозная дорога, пневмогидравлический аккумулятор, транспортные расходы, эффективность.


**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Влияние режимов движения лесовозного автопоезда при вывозке лесоматериалов на эффективность рекуперации энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве / В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков, А. В. Авдюхин // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 114–129. – Библиогр.: с. 125–128 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8>.


Поступила 09.11.2022 Пересмотрена 18.11.2022 Принята 19.11.2022 Опубликовано онлайн 26.12.2022


Article


## INFLUENCE OF THE MODES OF MOTION OF A LOGGING ROAD TRAIN DURING THE HAULING OF TIMBER ON THE EFFICIENCY OF ENERGY RECOVERY IN A PNEUMOHYDRAULIC FIFTH WHEEL COUPLING DEVICE


Valerii I. Posmetev<sup>1</sup>, posmetyev@mail.ru  0000-0001-9878-7451

Vladimir A. Zelikov<sup>1</sup>, zelikov-vrn@mail.ru  0000-0003-2317-9413

Vadim O. Nikonov<sup>1</sup>✉, 8888nike8888@mail.ru  0000-0002-7380-9180

Viktor V. Posmetev<sup>1</sup>, victorvpo@mail.ru  0000-0001-6622-5358

Alexey S. Chuikov<sup>2</sup>, offlex88@belstu.by  0000-0002-6923-7212

Aleksandr V. Avdyuhin<sup>1</sup>, 1988aav@mail.ru  0000-0003-2622-8946

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

<sup>2</sup>Belarussian State Technological University, 13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus

### Abstract

The necessity of increasing the efficiency of logging road trains by reducing the transport costs spent on hauling timber in existing road and climatic conditions is substantiated. A review of scientific research by foreign scientists is presented, which made it possible to identify the most significant factors influencing transportation costs. A promising design of a recuperative pneumohydraulic fifth wheel coupling device has been proposed, which makes it possible to reduce transportation costs by reducing the amount of fuel used by a road train, to increase the reliability of a logging road train by reducing the dynamic loads that occur between its links when driving over uneven surfaces of a logging road. The mathematical model of the movement of a timber tractor with a semi-trailer equipped with the proposed coupling device, under conditions of frequent accelerations and decelerations, over the unevenness of the logging road has been improved, which makes it possible to perform a preliminary assessment of the energy recovery by the proposed device in various modes of transient processes, as well as to investigate the influence of the main parameters of the recuperative pneumohydraulic fifth wheel coupling device for performance indicators. Two computer programs have been developed to study the performance indicators of a recuperative pneumohydraulic fifth wheel coupling under various transient modes of movement of a logging road train with given parameters of roughness of a logging road. It has been established that the use of the proposed coupling device in a logging road train makes it possible, when driving with randomly repeated decelerations and accelerations, to regenerate power up to 6.5 kW, and also to achieve a value of longitudinal acceleration of the semi-trailer relative to the tractor of 0.72 m/s<sup>2</sup>. Computer modeling made it possible to establish the value of the optimal diameter of the hydraulic cylinder, which provides the highest value of recuperated power at the lowest value of the acceleration of the semi-trailer relative to the tractor.

**Keywords:** computer simulation, experiment, recuperation, fifth wheel coupling, logging road train, logging road, pneumatic hydraulic accumulator, transportation costs, efficiency.

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

**For citation:** Posmetev V. I., Zelikov V. A., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Chuikov A. S., Avdyuhin A. V. (2022) Influence of the modes of motion of a logging road train during the hauling of timber on the efficiency of energy recovery in a pneumohydraulic fifth wheel coupling device. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 114-129 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8>.

*Received* 09.11.2022 *Revised* 18.11.2022 *Accepted* 19.11.2022 *Published online* 26.12.2022

### Введение

Транспорт играет важную роль во всех сферах экономики РФ, в том числе в лесной промышленности. Среди всех возможных видов транспорта леса наиболее часто используемым для вывозки лесоматериалов с промежуточных складов до объектов конечного использования является лесовозный автомобильный транспорт. Лесовозные дороги являются ключевой инфраструктурой, обеспечивающей доступ к лесоматериалам. Чтобы воспользоваться важными функциями лесовозных дорог, они должны быть хорошо обустроенными и удовлетворять необходимым требованиям. Недостаточная обустроенность лесовозных дорог ограничивает скорость движения лесовозных автопоездов и увеличивает время в пути, что негативно сказывается на увеличении транспортных расходов. В настоящее время доля расходов, связанных с вывозкой лесоматериалов лесовозными автопоездами, по отношению к общим затратам на лесозаготовительную деятельность значительна, и может достигать до 40–60 %. Себестоимость процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами, определяемая соотношением между объемом вывозимых лесоматериалов и эксплуатационными расходами, составляет около одной трети конечной стоимости лесоматериалов. С целью повышения эффективности процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами, лесозаготовительные предприятия стараются снизить транспортные расходы.

В связи с этим, поиск новых технических и организационных решений, направленных на снижение транспортных расходов, является актуальной задачей, что подтверждается результатами научных исследований многих зарубежных авторов, область интересов которых связана с повышением эффективности функционирования лесовозных автопоездов в существующих дорожных и природно-климатических условиях [1–7].

Stanley Schettiono и др. (2018) в своей работе исследовали эффективность использования лесовозных автомобилей малой грузоподъемности в условиях функционирования небольших лесозаготовительных предприятий с малым ежегодным объемом заготавливаемой древесины. Установлено, что использование лесовозных автомобилей малой грузо-

подъемности в рассматриваемых условиях позволяет снизить транспортные расходы, сократить капитальные вложения в лесовозные дороги, и как следствие, снизить себестоимость процесса вывозки лесоматериалов, что в свою очередь повысит рентабельность работы рассматриваемых лесозаготовительных предприятий, а также обеспечит их безопасность и устойчивость в экономическом плане [8].

В статье Edson Lachini и др. (2018) выполнен анализ технико-эксплуатационных факторов, оказывающих существенное воздействие на эффективность вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами, оснащенными технологическим гидравлическим оборудованием для погрузки и разгрузки лесоматериалов. Установлено, что на эффективность данного процесса оказывают влияние: время, затрачиваемое на маневрирование и ожидание, а также на процессы погрузки и разгрузки лесоматериалов; скорость движения автопоезда; время простоя при выполнении технического обслуживания и ремонта; степень использования грузоподъемности лесовозного автопоезда; обустроенность лесовозных дорог, рельеф местности; доступность проезда к местам погрузки и разгрузки; качество укладки лесоматериалов на погрузочную площадку [9].

В исследовании Cassio A. U. Monti и др. (2020) предложена модель оптимизации маршрутов вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами с гидравлическими манипуляторами, предназначенную для решения сложных проблем логистики в существующих условиях вывозки, учитывающую наиболее распространенные технические ограничения в лесной отрасли. Практическое использование предложенной модели дает возможность за счет прогнозирования возможных маршрутов транспортирования снизить общую стоимость вывозки лесоматериалов, путем повышения скорости вывозки, сокращения парка лесовозных автопоездов, исключения сверхурочной работы, а также непроизводительного использования установленного на лесовозных автопоездах технологического гидравлического оборудования для погрузки и разгрузки лесоматериалов [10].

Ingus Mitrofanovs и Marita Cekule (2019) в своей научной работе представили автоматическую высокоточную систему измерения объема загружен-

ных лесоматериалов в лесовозные автопоезда, основанную на методе анализа изображений. Данная система, обеспечивающая точность автоматизированного измерения объема лесоматериалов включает в себя измерительные арки с видеокамерами, программное обеспечение для обработки и анализа видеоматериалов, графический интерфейс, каналы передачи данных и систему хранения данных. Практическое использование предложенной системы оказывает значительное влияние на планирование, организацию, контроль, а также продолжительность процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами различной конфигурации [11].

Исследование Kari Vaatainen и др. (2021) посвящено обзору научных исследований в области логистических процессов вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Выявлено, что на процесс вывозки лесоматериалов оказывают значительное влияние: свойства сортов лесоматериалов, транспортная инфраструктура, обработка и хранение лесоматериалов, погодные условия, технология вывозки, производительность автопарка, маневренность автопоезда, а также квалификация водителей. Установлено, что эффективность вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами снижается при ухудшении доступности к нижним складам в сезон, когда лесовозные дороги из-за низкой несущей способности опорной поверхности находятся в неудовлетворительном состоянии. Также обнаружено, что полная масса лесовозного автопоезда и его полезная нагрузка оказывают существенное влияние на расход топлива [12].

В своей статье Olli-Jussi и др. (2019) исследовали процесс улучшения логистической и транспортной инфраструктуры лесной промышленности путем замены существующей системы вывозки лесоматериалов традиционными лесовозными автопоездами на систему вывозки большегрузными автопоездами. Моделирование возможных оптимальных маршрутов вывозки лесоматериалов различным количеством автопоездов в разные перегрузочные терминалы выявило, что использование большегрузных лесовозных автопоездов позволяет снизить количество ездов, сократить транспортные расходы, а также повышает производительность процесса вывозки [13].

Abdullah E. Akay и др. (2021) исследовали в

своей работе влияние обустроенности лесовозных дорог на экономические показатели эффективности вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Вывозка лесоматериалов лесовозными автопоездами по обустроенным лесовозным дорогам высокого класса позволяет увеличить общую чистую прибыль от вывозки, снизить транспортные и дорожные расходы, рассчитанные на 30 летний период до 5 %. Установлено, что использование лесовозных автопоездов большой грузоподъемности в сравнении с автопоездами малой грузоподъемности в исследуемых условиях способствует снижению почти на 50 % транспортных расходов [14].

Mouricio Asuna и др. (2019) в своей работе исследовали инновационный и альтернативный метод автоматического измерения объема лесоматериалов в лесовозном автопоезде. Для обработки изображения, полученных беспилотным летательным аппаратом использовалось фотограмметрическое программное обеспечение. Отклонение между фактическим и прогнозируемым объемом лесоматериалов на лесовозных автопоездах составило от 3,2 до 3,5 %. Практическое использование предлагаемого метода позволит улучшить взаимосвязь между водителями лесовозных автопоездов и лесозаготовительными предприятиями в процессе определения объема вывозимых лесоматериалов лесовозными автопоездами [15].

Проведенный анализ результатов исследований зарубежных ученых позволяет сделать вывод, что на транспортные расходы значительное влияние оказывают следующие факторы: грузоподъемность, время в пути, расход и стоимость топлива, загруженность автопоезда, квалификация водителей, конструктивные особенности лесовозных автопоездов, правовые нормы, регламентирующие скорость движения и грузоподъемность автопоездов, уровень обустроенности лесовозных дорог, оснащенность технологическим гидравлическим оборудованием, простои в ожидании процессов погрузки и разгрузки, простои при выполнении технического обслуживания, маневренность автопоезда, время погрузки и разгрузки, расстояние вывозки, скорость движения, рельеф местности, погодные условия, технология вывозки, доступность проезда к местам погрузки и разгрузки, качество укладки лесоматериалов на погрузочную площадку, оптимальность маршрута вывозки, использование современных тех-

нологий определения объема загружаемых лесоматериалов в лесовозные автопоезда, различие в объеме, массе и форме лесоматериалов, расходы, затрачиваемые на техническое обслуживание, на заработную плату водителей, применение геоинформационных систем управления автопарком.

Перспективным направлением, оказывающим влияние на снижения транспортных расходов, является использование в конструкциях современных лесовозных автопоездов рекуперативных механизмов и устройств, основанных на преобразовании, накоплении и полезном использовании раз-

личных видов энергии. Результаты более ранних научных исследований, выполненных авторами, связанных с разработкой и оценкой перспективных рекуперативных устройств для лесовозных автомобилей подтвердили свою эффективность. С учетом сложных дорожных и климатических условий эксплуатации лесовозных автопоездов при движении с нижних складов потребителям, авторами была разработана перспективная схема рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства (рис. 1).

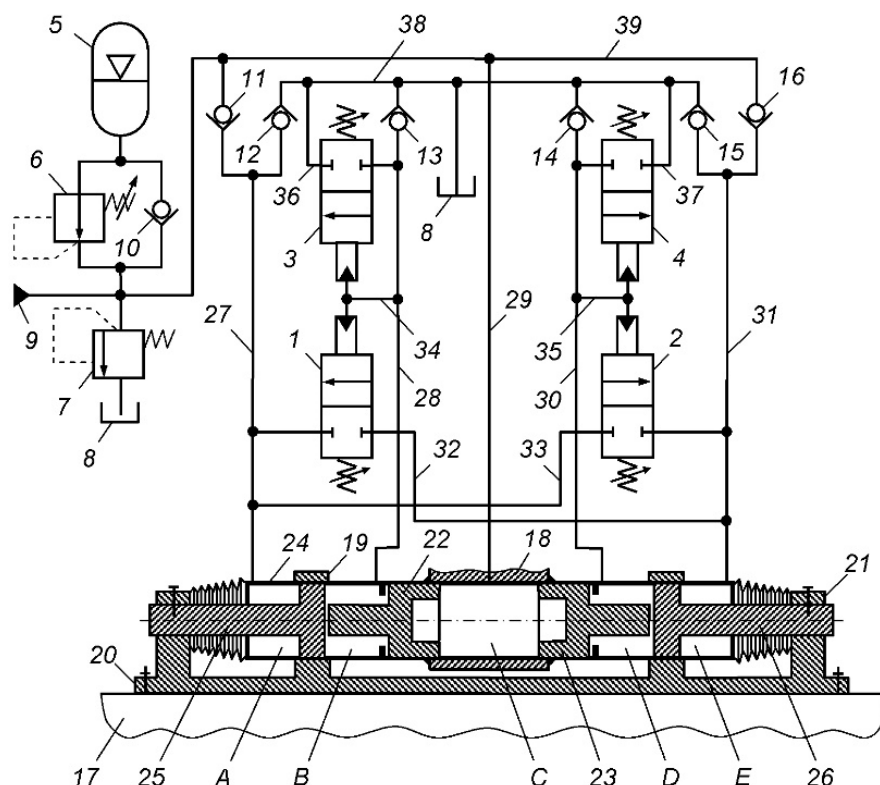


Рис. 1. Схема рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства:

*A, B, C, D и E* – рабочие полости гидроцилиндра; *1-4* – нормально закрытые двухпозиционные двухлинейные гидрораспределители; *5* – пневмогидравлический аккумулятор; *6* – редукционный клапан; *7* – предохранительный клапан; *8* – гидробак; *9* – порт присоединительный; *10-16* – клапаны обратные; *17* – рама тягача; *18* – кронштейн опорной плиты седла; *19* – радиальная опора; *20* – плита монтажная; *21* – осевая опора; *22, 23, 25, 26* – поршни; *24* – гидроцилиндр; *27-37* – трубопроводы соединительные; *38* и *39* – всасывающий и напорный трубопроводы

Figure 1. Scheme of a recuperative pneumohydraulic fifth wheel coupling device for a forestry road trains:

*A, B, C, D and E* – working cavities of the hydraulic cylinder; *1-4* – normally closed two-position two-line hydraulic valves; *5* – pneumohydraulic accumulator; *6* – pressure reducing valve; *7* – safety valve; *8* – hydraulic tank; *9* – connecting port; *10-16* – check valves; *17* – tractor frame; *18* – saddle base plate bracket; *19* – radial support; *20* – mounting plate; *21* – axial support; *22, 23, 25, 26* – pistons; *24* – hydraulic cylinder; *27-37* – connecting pipelines; *38* and *39* – suction and pressure pipelines

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Использование такого устройства дает возможность сократить транспортные расходы, затрачиваемые на лесовозный тягач с полуприцепом. Сокращение транспортных расходов достигается за счет снижения количества используемого автопоездом топлива, повышения надежности лесовозного автопоезда за счет уменьшения динамических нагрузок, возникающих между его звеньями при движении по неровностям поверхности лесовозной дороги [16, 17].

Цель работы достигается путем решения двух взаимосвязанных задач. Первая – разработка математической модели механических и гидравлических процессов, происходящих при функционировании пневмогидравлического седельно-сцепного устройства. Вторая – предварительная оценка эффективности на основании разработанных компьютерных программ предлагаемой рекуперативной системы седельно-сцепного устройства.

### Материалы и методы

При вывозке лесоматериалов лесовозным автопоездом в сложных дорожных условиях происходят его периодические ускорения и замедления в соответствии с изменяющейся дорожной обстановкой. Это сопровождается значительным изменением величины и направления силы между лесовоз-

ным тягачом и полуприцепом с лесоматериалами. Предлагаемое рекуперативное пневмогидравлическое седельно-сцепное устройство позволяет сгладить резкие изменения данной силы, улучшая плавность хода лесовозного автопоезда, дает возможность накопить и полезно использовать энергию рабочей жидкости в технологическом оборудовании автопоезда. Для предварительного исследования эффективности работы рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства в процессе вывозки лесоматериалов лесовозным тягачом с полуприцепом по неровностям поверхности лесовозной дороги в режимах со случайно возникающими разгонами и торможениями на всем исследуемом участке пути (порядка 1-10 км) дополнена на основе методов классической механики разработанная ранее авторами математическая модель, и также созданы на ее основе две оригинальные компьютерные программы.

Дополнение к ранее разработанной математической модели заключается в представлении в процессе математического моделирования механических и гидравлических процессов, происходящих в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве в виде упрощенной расчетной схемы (рис. 2).

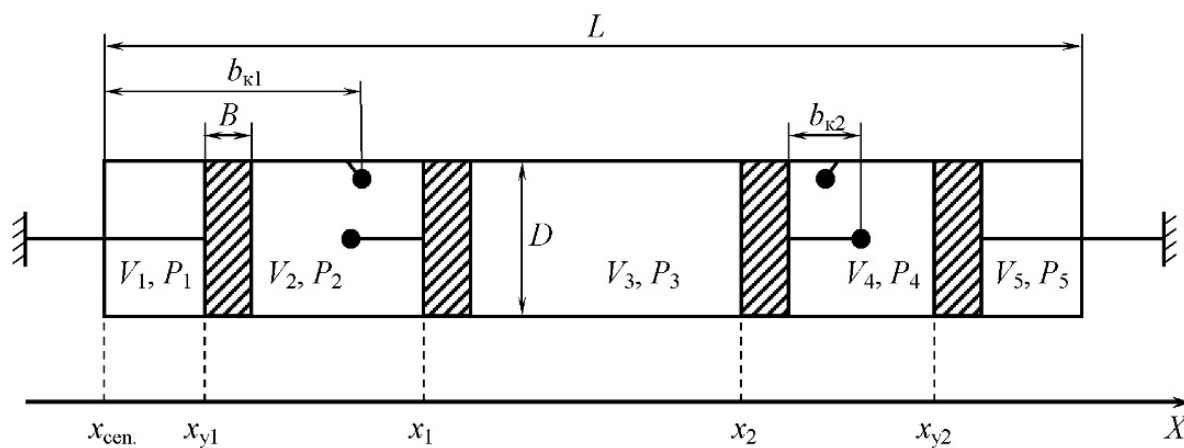


Рис. 2. Расчетная схема для моделирования механических и гидравлических процессов в рекуперативном пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве

Figure 2. Calculation scheme for modeling mechanical and hydraulic processes in a regenerative pneumohydraulic fifth wheel coupling

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

При описании гидравлических процессов устройство рассматривается, как пять отдельных полостей объемами  $V_1, \dots, V_5$  с давлениями рабочей жидкости  $P_1, \dots, P_5$ . Полости отделены друг от друга четырьмя поршнями шириной  $B$  и диаметром  $D$ , совпадающим с диаметром основного цилиндра. Положение поршней относительно неподвижной системы координат задается координатами  $x_{y1}, x_1, x_2, x_{y2}$ . Движение поршней ограничивается упорами двух типов: отстоящими от торцов цилиндра на расстоянии  $b_{к1}$  и от второго и третьего поршней на расстоянии  $b_{к2}$  [18-20].

В процессе движения лесовозного автопоезда рекуперативный цилиндр, связанный с полуприцепом, перемещается относительно неподвижной системы координат, связанной с лесовозным тягачом. Положение рекуперативного цилиндра задается координатой его торца  $x_{cen.}$

В основе математического моделирования гидравлической подсистемы лежит уравнение, определяющее возрастание давления в полости при изменении ее объема:

$$\frac{dP_i}{dV_i} = -\frac{E}{V_i}, \quad (1)$$

где  $V_i$  – объем полости  $i$ ;  $P_i$  – давление полости  $i$ ;  $E$  – объемный модуль упругости рабочей жидкости.

Каждая из исследуемых пяти полостей связана посредством приведенных элементов гидросистемы с пневмогидравлическим аккумулятором. В математической модели в случае превышения давления рабочей жидкости в одной из исследуемых полостей  $i$  воспроизводится ее перетекание в пневмогидравлический аккумулятор, а также повышение давления рабочей жидкости в нем. В этом случае расход рабочей жидкости  $Q_{iA}$  рассчитывается по следующей зависимости:

$$Q_{iA} = k_{iA} \sqrt{|P_i - P_A|}, \quad (2)$$

где  $i$  – порядковый номер одной из исследуемых полостей;  $A$  – индекс пневмогидравлического аккумулятора;  $k_{iA}$  – коэффициент, характеризующий процесс дросселирования рабочей жидкости между исследуемыми полостями и пневмогидравлическим аккумулятором.

В математической модели принято допущение, что все дросселирующие элементы обладают круглым сечением. В этой связи, коэффициент, характеризующий дросселирование, рассчитывается с учетом диаметра отверстия  $d_{ij}$  по зависимости:

$$k_{iA} = \mu \frac{\pi d_{ij}^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода рабочей жидкости;  $\gamma$  – удельный вес рабочей жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Перемещение цилиндра относительно двух неподвижных поршней и перемещение двух других подвижных поршней приводит к изменению объемов рассматриваемых полостей, поэтому на каждом шаге численного интегрирования уравнений состояния системы производится перерасчет объемов полостей по координатам расположения полостей:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} (x_{y1} - x_{cen.}); \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{\pi D^2}{4} (x_1 - (x_{y1} + B)); \quad (5)$$

$$V_3 = \frac{\pi D^2}{4} (x_2 - (x_1 + B)); \quad (6)$$

$$V_4 = \frac{\pi D^2}{4} (x_{y2} - (x_2 + B)); \quad (7)$$

$$V_5 = \frac{\pi D^2}{4} (x_{cen.} + L - (x_{y2} + B)). \quad (8)$$

Изменение объемов полостей с рабочей жидкостью сопровождается изменением в них давления. Расчет новых значений давления  $P_i$  в исследуемых полостях на шаге интегрирования  $\tau$  осуществляется по следующей формуле:

$$P_i^\tau = P_i^{\tau-1} - E \frac{V_i^\tau - V_i^{\tau-1}}{V_i^\tau}. \quad (9)$$

В случае если расчетное значение давления в исследуемых полостях на последующем шаге интегрирования имеет малое или отрицательное значение, то ему присваивается нулевое значение с отрицательным давлением:

$$P_i^r = \begin{cases} P_i^r, & P_i^r > 0; \\ 0, & P_i^r < 0. \end{cases} \quad (10)$$

В конечно-разностном представлении перетекание рабочей жидкости из полости  $i$  в пневмогидравлический аккумулятор под действием разности давлений рассчитываются по формуле:

$$\text{если } P_i > P_A, \text{ то } \begin{cases} V_i = V_i - k_{iA} \sqrt{P_i - P_A} \Delta t; \\ V_A = V_A + k_{iA} \sqrt{P_i - P_A} \Delta t. \end{cases} \quad (11)$$

где  $\Delta t$  – шаг интегрирования дифференциальных уравнений.

В результате интегрирования уравнений движения определяются таблично заданные функ-

$$m_{\text{mov.pis.}} \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{\pi D^2}{4} (P_2 - P_3) - d_{\text{vis.fr.}} \frac{dx_1}{dt} + \begin{cases} 0, & x_1 - b_{k2} \geq x_{y1} + B; \\ c_{k2} ((x_1 - b_{k2}) - (x_{y1} + B)) + d_{k2} \frac{d(x_1 - x_{y1})}{dt}, & x_1 - b_{k2} < x_{y1} + B; \end{cases} + \begin{cases} 0, & x_1 \geq x_{\text{cen.}} + b_{k1}; \\ c_{k1} (x_1 - (x_{\text{cen.}} + b_{k1})) + d_{k1} \frac{d(x_1 - x_{\text{cen.}})}{dt}, & x_1 < x_{\text{cen.}} + b_{k1}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $m_{\text{mov.pis.}}$  – масса подвижного поршня;  $t$  – время;  $d_{\text{vis.fr.}}$  – коэффициент вязкого трения подвижного поршня о стенки рекуперативного цилиндра;  $B$  – толщина поршня;  $c_{k1}$  и  $c_{k2}$  – коэффициенты жесткости контакта подвижного поршня с упорами двух типов;  $d_{k1}$  и  $d_{k2}$  – коэффициенты демпфирования контакта подвижного поршня с упорами двух типов. Аналогичным уравнением описывается движение второго подвижного поршня.

В процессе имитационного моделирования уравнения движения подвижных поршней решаются численно, параллельно решению уравнений движения лесовозного тягача и прицепа, а также уравнений гидравлической системы.

Таким образом, разработанная модель воспроизводит основные принципы работы предложенного рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства и основные механические и гидравлические процессы при движении лесовозного автопоезда.

С целью исследования разработанной математической модели и проведения серий компьютерных экспериментов разработаны две компьютерные программы. Первая программа моделирует движе-

нии зависимости от времени объемов полостей и давлений рабочей жидкости в них. По известным давлениям в полостях рассчитываются силы, действующие на поршни рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства, и учитываемые далее в механической подсистеме модели. Силы давления, действующие со стороны рабочей жидкости на неподвижные поршни, оказывают воздействие на лесовозный тягач. Возникающие же силы при контакте подвижных поршней с упорами в рекуперативном цилиндре, оказывают силовое воздействие на полуприцеп с лесоматериалами. Силы давления со стороны рабочей жидкости способствуют движению подвижных поршней. Движение подвижного поршня  $x_1$  описывается уравнениями:

ние лесовозного автопоезда с переменным ускорением без детального воспроизведения в модели особенностей работы рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства (рис. 3).

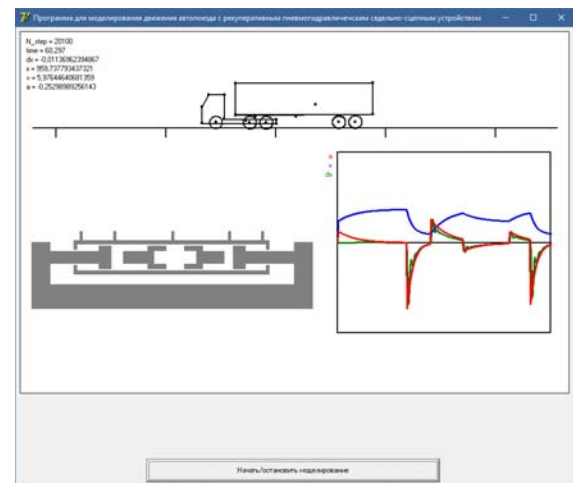


Рис. 3. Вывод на экран результатов моделирования движения лесовозного автопоезда

Figure 3. Displaying results simulating the movement of a road train

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



Вторая программа предназначена для детального моделирования гидравлических процессов при работе разработанного рекуперативного пневмогидравлического седельно-цепного устройства лесовозного автопоезда (рис. 4).

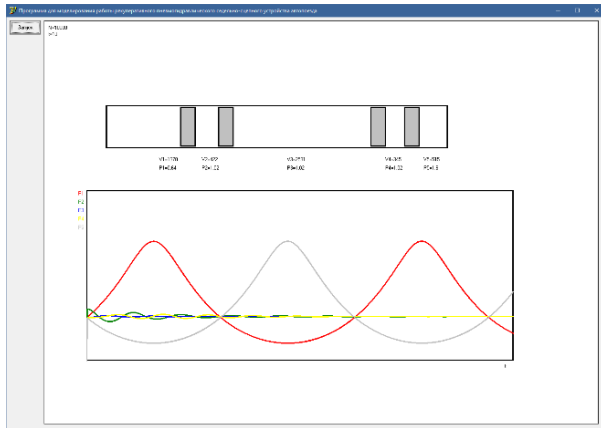


Рис. 4. Вывод на экран результатов моделирования работы предлагаемого сцепного устройства

Figure 4. Displaying the results of simulation of the operation of the proposed coupling device

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

В коде программы задаются геометрические и физические параметры рекуперативного пневмогидравлического седельно-цепного устройства, а также характер движения седла лесовозного автопоезда. В процессе работы программа выводит на экран схематичное изображение седельно-цепного устройства, текущие значения и графики зависимости от времени параметров полостей устройства. Программа может использоваться для оценки эффективности различных вариантов пневмогидравлического устройства с широкими диапазонами изменения их параметров.

Разработанные математическая модель и на ее основе компьютерная программа обладают требуемой геометрической и физической адекватностью. Компьютерная программа дает возможность задавать в процессе исследования значения геометрических и физических параметров предлагаемого сцепного устройства, лесовозного автопоезда. Кроме этого, программа позволяет изменять режимы движения лесовозного автопоезда. Исследуемые в работе входные и выходные параметры схематично представлены на рис. 5.

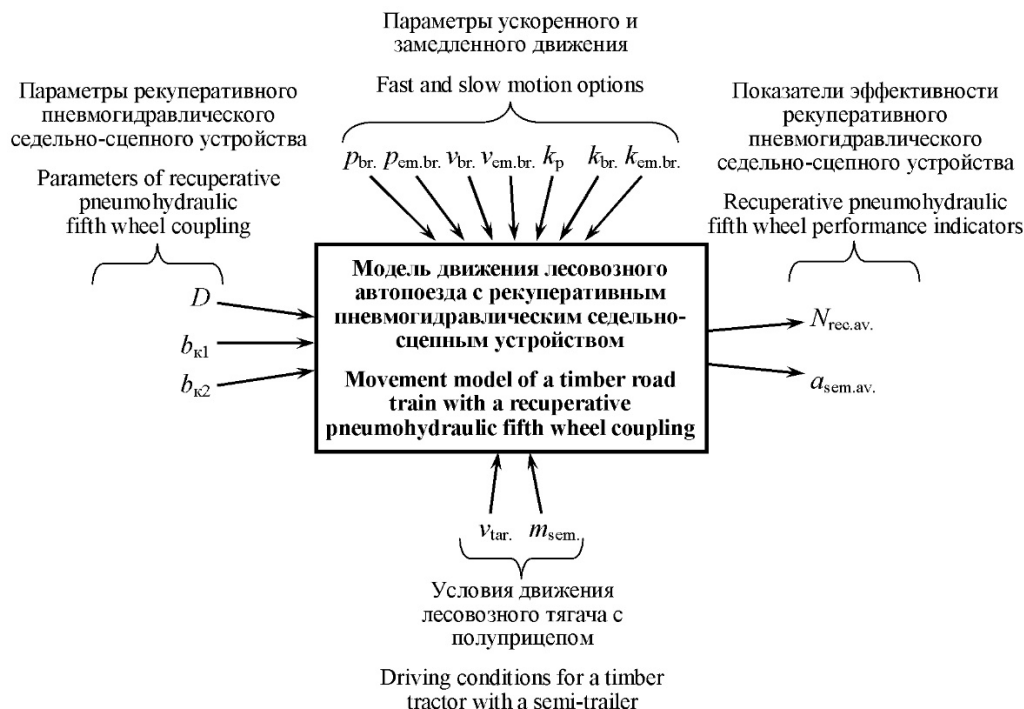


Рис. 5. Исследуемые в работе входные и выходные параметры математической модели

Figure 5. The input and output parameters of the mathematical model studied in the work

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Первую группу входных переменных образуют основные параметры предлагаемого рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства:  $D$  – внутренний диаметр гидравлического цилиндра;  $b_{k1}$  и  $b_{k2}$  – геометрические параметры упоров подвижных поршней рекуперативного устройства. Вторую группу входных переменных образуют основные условия движения лесовозного тягача с полуприцепом:  $v_{tar}$  – целевая скорость движения;  $m_{sem}$  – масса полуприцепа с лесоматериалами. В третью группу входят:  $k_p$ ,  $k_{br}$ ,  $k_{em.br}$  – коэффициенты управления разгоном, плановым и экстренным торможением лесовозного тягача с полуприцепом;  $v_{br}$  и  $v_{em.br}$  – скорости движения лесовозного тягача с полуприцепом, до которых производится плановое и экстренное торможение;  $p_{br}$  и  $p_{em.br}$  – вероятности начала торможения и экстренного торможения лесовозного тягача с полуприцепом.

Эффективность работы предлагаемого устройства оценивается значениями рекуперированной устройством мощности  $N_{rec.av.}$ , а также продольного ускорения  $a_{sem.av.}$  полуприцепа относительно лесовозного тягача.

Эффективность работы предлагаемого рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства тем выше, чем выше значение рекуперированной мощности, обеспечиваемое устройством в процессе вывозки лесоматериалов автопоездом по неровностям лесовозной дороги, а также чем ниже значение продольного ускорения полуприцепа относительно лесовозного тягача.

## Результаты и обсуждения

С помощью разработанной модели изучено влияние диаметра  $D$  гидроцилиндра рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства на исследуемые показатели его эффективности. Выполнена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли  $D$  от 60 до 160 мм с шагом 20 мм.

На рис. 6 и 7 помимо точек, полученных в результате компьютерного эксперимента, приведены зеленые сплошные кривые, представляющие собой результат аппроксимации методом наименьших квадратов полиномом второго порядка (для рис. 7,  $a$  – полиномом третьего порядка), красные штриховые линии – границы доверительного ин-

тервала (confidenceband) со статистической достоверностью 0,95, пунктирные синие линии – границы интервала прогнозирования (predictionband) со статистической надежностью 0,95.

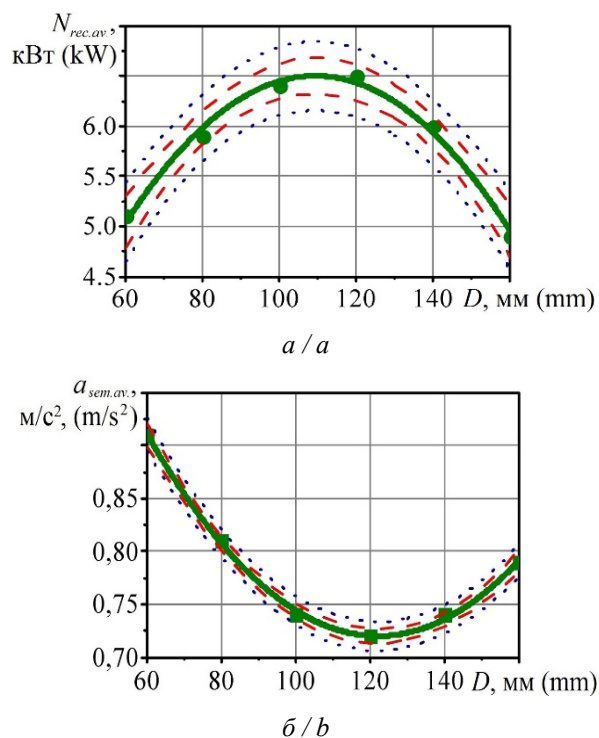


Рис. 6. Влияние диаметра гидравлического цилиндра предлагаемого сцепного устройства на изменение рекуперированной мощности  $N_{rec.av.}$  (а) и продольного ускорения полуприцепа с лесоматериалами  $a_{sem.av.}$  (б) относительно лесовозного тягача

Figure 6. Influence of the diameter of the hydraulic cylinder of the proposed coupling device on the change in the recuperated power  $N_{rec.av.}$  (a) and longitudinal acceleration of the timber semi-trailer  $a_{sem.av.}$  (b) in relation to a timber tractor

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

При малых значениях диаметра цилиндра 60–80 мм в процессе разгонов, а также торможений лесовозного автопоезда происходят существенные перемещения гидроцилиндра относительно неподвижных поршней и, соответственно, полуприцепа с лесоматериалами относительно лесовозного тягача. Это обусловлено малой площадью поршней, из-за чего силы, действующие со стороны гидравлической подсистемы на механическую, оказываются

сравнительно малыми. Из-за малых объемов полостей гидроцилиндра рекуперированная мощность достаточно низкая – 5,1-5,9 кВт (рис. 6, а). При этом высокая подвижность рекуперативного пневмогидравлического седельно-цепного устройства приводит к высоким значениям среднего ускорения полуприцепа с лесоматериалами относительно лесовозного тягача 0,8 ... 0,81 м/с<sup>2</sup> (рис. 6, б).

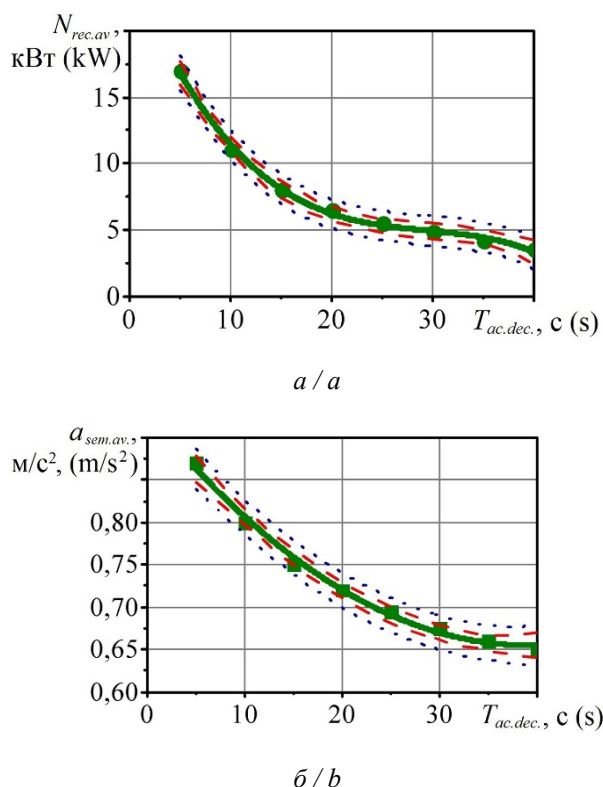


Рис. 7. Влияние средней длительности цикла разгона-торможения  $T_{ac.dec.}$  лесовозного автопоезда на изменение рекуперированной мощности  $N_{rec.av.}$  (а) и продольного ускорения полуприцепа с лесоматериалами  $a_{sem.av.}$  (б) относительно лесовозного тягача

Figure 7. Effect of average accel-decel cycle  $T_{ac.dec.}$  timber road train to change the recuperated power  $N_{rec.av.}$  (a) and longitudinal acceleration of the timber semi-trailer  $a_{sem.av.}$  (b) in relation to a timber tractor

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

При больших значениях диаметра гидроцилиндра 140-160 мм велика площадь поршней рекуперативного гидроцилиндра, из-за чего небольшие перемещения поршней приводят к возникновению существенных сил, действующих со стороны гид-

равлической подсистемы на механическую. Из-за этого возникающие при разгонах и торможениях груженного лесовозного автопоезда силы не приводят к существенному перемещению элементов рекуперативного устройства, что отражается в низком значении рекуперированной мощности 4,9-6,0 кВт и в малой сглаживающей способности рекуперативного устройства (среднее ускорение  $a_{sem.av.}$  составляет 0,74 ... 0,79 м/с<sup>2</sup>). Оптимальным является диаметр гидроцилиндра 100 ... 120 мм. При этом достигается высокое значение рекуперированной мощности в пределах от 6,4 до 6,5 кВт при наименьшем значении ускорения полуприцепа с лесоматериалами относительно лесовозного тягача 0,72 ... 0,73 м/с<sup>2</sup>.

Рекуперированная разработанным пневмогидравлическим седельно-цепным устройством мощность должна зависеть от частоты разгонов и торможений лесовозного автопоезда. Более удобным для анализа параметром является средняя длительность цикла разгона-торможения  $T_{ac.dec.}$  Для исследования влияния длительности цикла разгона-торможения осуществлена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли  $T_{ac.dec.}$  от 5 до 40 секунд с шагом 5 секунд. Выявлено, что с уменьшением длительности цикла  $T_{ac.dec.}$  рекуперированная мощность возрастает по закону, близкому к обратной пропорциональности (рис. 7, а). Однако зависимость слабее обратно-пропорциональной, так как при уменьшении  $T_{ac.dec.}$  менее переходные процессы при разгоне и торможении становятся менее выраженными. Среднее ускорение полуприцепа с лесоматериалами относительно лесовозного тягача так же уменьшается с увеличением  $T_{ac.dec.}$  (рис. 7, б). Таким образом, при изменении в широких диапазонах длительности цикла разгона-торможения от 5 до 40 с рекуперативное устройство остается эффективным и позволяет выделять 3,5 ... 17,3 кВт мощности. При этом неблагоприятное среднее ускорение полуприцепа 0,65 ... 0,96 м/с<sup>2</sup> находится в приемлемом диапазоне менее 1,00 м/с<sup>2</sup>.

## Выводы

Обзор научных исследований зарубежных ученых позволил выявить наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на транспортные расходы,

затрачиваемые на процесс вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. С целью снижения транспортных расходов, авторами предложена перспективная конструкция рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства. Ее использование дает возможность сократить расход топлива лесовозным тягачом при движении автопоезда в существующих дорожных и природно-климатических условиях.

В соответствии с целью работы разработана математическая модель механических и гидравлических процессов, происходящих при функционировании пневмогидравлического седельно-сцепного устройства в процессе вывозки лесоматериалов лесовозным автопоездом. Модель дает возможность осуществить предварительную оценку рекуперации энергии предлагаемым устройством при частых ускорениях и торможениях лесовозного автопоезда, а также исследовать влияние основных параметров рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства на показатели его эффективности.

На основании сформулированной цели работы разработаны две компьютерные программы для исследования показателей эффективности функционирования

рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства в процессе вывозки лесоматериалов лесовозным автопоездом. Установлено, что использование предлагаемого сцепного устройства в лесовозном автопоезде дает возможность при движении со случайно повторяющимися замедлениями и ускорениями рекуперировать мощность до 6,5 кВт, а также достигать значения продольного ускорения полуприцепа относительно тягача  $0,72 \text{ м/с}^2$ .

Компьютерное моделирование позволило установить значение оптимального диаметра гидравлического цилиндра, обеспечивающего наибольшее значение рекуперированной мощности при наименьшем значении ускорения полуприцепа относительно тягача. Оптимальный диаметр составил 100 ... 120 мм. При этом наибольшее значение рекуперированной мощности достигает – 6,4 ... 6,5 кВт. Наименьшее значение ускорения полуприцепа относительно тягача –  $0,72 \dots 0,73 \text{ м/с}^2$ . При изменении в широких диапазонах длительности цикла разгона-торможения от 5 до 40 с рекуперативное устройство остается эффективным и позволяет генерировать 3,5 ... 17,3 кВт мощности. При этом неблагоприятное среднее ускорение полуприцепа  $0,65 \dots 0,96 \text{ м/с}^2$  находится в приемлемом диапазоне менее  $1,00 \text{ м/с}^2$ .

### 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. Eric Johannes. Sustainable Timber Transport – Economic Aspects of Aerodynamic Reconfiguration / Eric Johannes, Petter Ekman, Maria Hüge-Brodin, Matts Karlsson // Sustainability. 2018, – 10. – 18 p. – *Библиогр.*: pp. 17-18 (27 titles). – DOI 10.3390/su10061965.
3. Christoph Kogler. Simulation Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain / Christoph Kogler, Alexander Stenitzer, Peter Rouch // Forests. 2020, – 11, – 1244. – 15 p. – *Библиогр.*: pp. 14-15 (27 titles). – DOI 10.3390/f11121245.
4. 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 10.3390/f12070855.
5. Teijo Palander. Improving Energy Efficiency in a Synchronized Road – Transportation System by Using a TFMC (Transportation Fleet – Management Control) in Finland / Teijo Palander, Kalle Karha // Energies. 2019, 12, 670. – 15 p. – *Библиогр.*: pp. 14-15 (57 titles). – DOI 10.3390/en12040670.
6. Sunday Bako Stability Analysis of a Semi-Trailer Articulated vehicle: A Review / Sunday Bako, Bori Ige, Abdulkarim Nasir, Nicholas A. Musa // International journal of automotive science and technology. 2021. Vol. 5. № 2. pp. 131-140. – *Библиогр.*: pp. 138-140 (74 titles). – DOI 10.30939/ijastech..855733.

7. Mohammad Reza Ghaffariyan. A short review of timber truck fuel consumption studies / Australian Forests Operation Research Alliance Afora Industry – Research – Innovation / Mohammad Reza Ghaffariyan, Camille Barrier, Mark Brown, Martin Kuehmaier, Mauricio Acuna // *Industry Bulletin* 21, 2018. – 6 p. – *Bibliogr.: pp. 5-6 (14 titles)*.
8. Stanley Schettino. Feasibility analysis of the use of light and medium trucks in timber transport in rural properties / Stanley Schettino, Luciano Jose Minette, Carolina Freitas Schettino, Isabela Dias Reboledo // *Revista Arvore*. 2018 42 (6) : e420608 – 9 p. *Bibliogr.: pp. 8-9 (25 titles)*. – DOI 10.1590/1806-908820118000600008.
9. Edson Lachini. Operational Analysis of Forestry Transportation Using Self-loading Trucks in a Mountainous Region / Edson Lachini, Nilton Fiedler, Gilson Silva, Christiano Pinheiro, Flavio Carmo // *Floreste e Ambiente* 2018 25(4) e20150060. – 7 p. *Bibliogr.: pp. 6-7 (12 titles)*. – DOI 10.1590/2179-8087.006015.
10. Cassio A. U. Monti. Optimization of Wood Supply : The Forestry Routing Optimization Model / Cassio A. U. Monti, Lucas R. Gomide, Rafael M. Oliveira, Luciano C. J. Franca // *An Acad Bras Cienc* (2020) 92(3) : e20200263. – 17 p. *Bibliogr.: pp. 14-17 (62 titles)*. – DOI 10.1590/0001-3765202020200263.
11. Ingus Mitrofanovs. Effective Collaboration Research Project On It Solution For Automatic Measurement Of Timber Assortment / Ingus Mitrofanovs, Marita Cekule // *Systemics, cybernetics and informatics*, Volume 17, 2019 pp. 78-83. *Bibliogr.: pp. 83 (26 titles)*.
12. Kari Vaatainen. Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden / Kari Vaatainen, Perttu Anttila, Lars Elisson, Johanna Enstrom, Juha Laitila, Robert Prinz, Johanna Routa // *Croat. j. for. eng.* 42 (2021) 1 pp. 39-61. *Bibliogr.: pp. 54-61 (189 titles)*. – DOI 10.5552/crojfe.2021.803.
13. Olli-Jussi Korpinen. Impacts of a High-Capacity Truck Transportation System on the Economy and Traffic Intensity of Pulpwood Supply in Southeast Finland / Olli-Jussi Korpinen, Mika Aalto, Picjo Venalainen, Tapio Ranta // *Croat. j. for.* 40 (2019) 1 pp. 89-105. *Bibliogr.: pp. 103-104 (38 titles)*.
14. Abdullah E. Akay. Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products / Abdullah E. Akay, Hasan Serin, John Sessions, Ebru Bilici, Mehmet Pak // *Croat. j. for. eng.* 42 (2021) 2 – pp. 245-258. *Bibliogr.: pp. 257-258 (20 titles)*. – DOI 10.5552/crojfe.2021.851.
15. Mauricio Acuna. Automated Volumetric Measurements of Truckloads through Multi-View Photogrammetry and 3D Reconstruction Software / Mauricio Acuna, Amanda Sosa // *Croat. j. for. eng.* 40 (2019) 1 – pp. 151-162. *Bibliogr.: pp. 160-161 (30 titles)*.
16. Патентна изобретение № 2753024 РФ, МПК В62D 53/08. Рекуперативное пневмо-гидравлическое седельно-сцепное устройство автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. В. Авдюхин, В. В. Посметьев ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова. – № 2020144373 ; заявл. 30.12.2020 ; опубл. 11.08.2021.
17. Посметьев, В. И. Оценка актуальности использования в конструкции лесовозного тягача с полуприцепом рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. В. Авдюхин // *Воронежский научно-технический вестник*. – 2021. – Т. 3, № 3 (37). – с. 76-94 – *Библюгр.: с. 92-94 (32 назв.)*. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-76-94.
18. Nikonov, V. O. The results of simulation modeling of the operation of the regenerative fifth wheel hitch of a timber trailer / V O Nikonov, V I Posmetev and V V Posmetev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 656 (2019) 012039, – Pp. 1-8. *Bibliogr.: pp. 8 (6 titles)*. – DOI 10.1088/1757-899X/656/1/012039.
19. Посметьев, В. И. Имитационное моделирование рекуперативного пружинно-гидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного тягача с полуприцепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. В. Авдюхин // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10. – № 4 (40). – С. 227–242. *Библюгр.: с. 239-241 (20 назв.)*. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/19.
20. Посметьев, В. И. Моделирование работы рекуперативного пружинно-гидравлического седельно-сцепного устройства, размещенного в полуприцепа лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов // *Лесотехнический журнал*. – 2021. – Т. 11. – № 2 (42). – С. 133-148. *Библюгр.: с. 145-147 (17 назв.)*. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.2/13.

### References

1. Nikonov V. O. *Sovremennoe sostoyanie, problemi i puti povisheniya effektivnosti lesovoznogo avtomobilnogo transporta* [Current state, problems and ways to improve the efficiency of timber road transport]. Monograph ; 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. Eric Johannes, Petter Ekman, Maria Huge-Brodin, Matts Karlsson Sustainable Timber Transport – Economic Aspects of Aerodynamic Reconfiguration. *Sustainability*, 2018, 10. – 18 p. : doi : 10.3390/su10061965.
3. Christoph Kogler, Alexander Stenitzer, Peter Rouch Simulation Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests* 2020, 11, 1244. – 15 p. : doi : 10.3390/f11121245.
4. 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 : 10.3390/f12070855.
5. Teijo Palander, Kalle Karha 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 :10.3390/en12040670.
6. Sunday Bako, Bori Ige, Abdulkarim Nasir, Nicholas A. Musa Stability Analysis of a Semi-Trailer Articulated vehicle: A Review. *International journal of automotive sci-ence and technology*, 2021, Vol. 5, № 2, pp. 131-140 : doi : 10.30939/ijastech..855733.
7. Mohammad Reza Ghaffariyan, Camille Barrier, Mark Brown, Martin Kuehmaier, Mauricio Acuna A short review of timber truck fuel consumption studies. *Australian Forests Operation Research Alliance Afora Industry – Research – Innovation. Industry Bulletin* 21, 2018. – 6 p.
8. Stanley Schettino, Luciano Jose Minette, Carolina Freitas Schettino, Isabela Dias Reboleto Feasibility analysis of the use of light and medium trucks in timber transport in rural properties, *Revista Arvore*. 2018 42(6) : e420608 ;doi : 10.1590/1806-908820118000600008.
9. Edson Lachini, Nilton Fiedler, Gilson Silva, Christiano Pinheiro, Flavio Carmo Operational Analysis of Forestry Transportation Using Self-loading Trucks in a Mountainous Region, *Floresta e Ambiente* 2018 25(4) e20150060. – 7 p. ;doi : 10.1590/2179-8087.006015.
10. Cassio A. U. Monti, Lucas R. Gomide, Rafael M. Oliveira, Luciano C. J. Franca Optimization of Wood Supply : The Forestry Routing Optimization Model, *An Acad Bras Cienc* (2020) 92(3) : e20200263. – 17 p. ; doi :10.1590/0001-3765202020200263.
11. Ingus Mitrofanovs, Marita Cekule Effective Collaboration Research Project On It Solution For Automatic Measurement Of Timber Assortment / Systemics, cybernetics and informatics, Volume 17, 2019 pp. 78-83.
12. Kari Vaatainen, Perttu Anttila, Lars Elisson, Johanna Enstrom, Juha Laitila, Robert Prinz, Johanna Routa Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden, *Croat. j. for. eng.* 42 (2021) 1 pp. 39-61; doi :10.5552/crojfe.2021.803.
13. Olli-Jussi Korpinen, Mika Aalto, Picjo Venalainen, Tapio Ranta Impacts of a High-Capacity Truck Transportation System on the Economy and Traffic Intensity of Pulpwood Supply in Southeast Finland, *Croat. j. for.* 40 (2019) 1 pp. 89-105.
14. Abdullah E. Akay, Hasan Serin, John Sessions, Ebru Bilici, Mehmet Pak 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 : 10.5552/crojfe.2021.851.
15. Mauricio Acuna, Amanda Sosa Automated Volumetric Measurements of Truckloads through Multi-View Photogrammetry and 3D Reconstruction Software, *Croat. j. for. eng.* 40 (2019) 1 – pp. 151-162.
16. Posmetev V. I., e. a. *Rekuperativnoe pnevmogidravlichesкое sedelno-sceпное ustroistvo avtopoezda* [Recuperative pneumohydraulic fifth wheel coupling of road train]. Patent RF, № 2753024, 2021.
17. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Avdyuhin A. V. *Ocenka aktualnosti ispolzovaniya v konstrukcii lesovoznogo tyagacha s polupricepom rekuperativnogo pnevmogidravlichesкого sedelno-sceпного ustroistva* [Assessment of the



relevance of using a recuperative pneumohydraulic fifth wheel coupling in the design of a timber tractor with a semi-trailer]. *Voronejskii nauchno-tehnicheskii vestnik* [Voronezh scientific and technical bulletin]. – 2021. – Т. 3, № 3 (37). – pp. 76-94 ;doi : 10.34220/2311-8873-2022-76-94.(In Russ.).

18. Nikonov V O The results of simulation modeling of the operation of the regenerative fifth wheel hitch of a timber trailer / V O Nikonov, V I Posmetev and V V Posmetev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 656 (2019) 012039, – Pp. 1-8;doi : 10.1088/1757-899X/656/1/012039.

19. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Avdyuhin A. V. *Imitacionnoe modelirovanie rekuperativnogo prujinno-gidravlicheskogo sedelno-scepnogo ustroistva lesovoznogo tyagacha s polupricepom* [Simulation of a regenerative spring-hydraulic fifth wheel coupling device of a timber tractor with a semitrailer]. *Lesotekhnicheskii jurnal* [Forestry Engineering Journal], – 2020. – №. 4 – pp. 227-242 ;doi : 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/19. (In Russ.).

20. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A. *Modelirovanie raboti rekuperativnogo prujinno-gidravlicheskogo sedelno-scepnogo ustroistva, razmeshennogo v polupricepa lesovoznogo avtopoezda* [Simulation of the operation of a recuperative spring-hydraulic fifth wheel coupling placed in a semi-trailer of a logging road train]. *Lesotekhnicheskii jurnal* [Forestry Engineering Journal], – 2021. – №. 2 (42) – pp. 133-148 ;doi : 10.34220/issn.2222-7962/2021.2/13. (In Russ.).

### Сведения об авторах

*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](mailto: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](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

✉ *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](mailto:8888nike8888@mail.ru).

*Посметьев Виктор Валерьевич* – кандидат физико-математических наук, 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: [victoryvpo@mail.ru](mailto:victoryvpo@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](mailto:offlex88@belstu.by).

*Авдюхин Александр Владимирович* – аспирант 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/0000-0003-2622-8946>, e-mail: [1988aav@mail.ru](mailto:1988aav@mail.ru).

### Information about the authors

*Posmetev Valerii Ivanovich* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova, st.

Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto: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](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

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

*Posmetev Viktor Valerevich* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: [victorvp@mail.ru](mailto:victorvp@mail.ru).

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

*Avdyuhin Aleksandr Vladimirovich* – the post-graduate student of production, repair and operation of cars Federal State Budget Educational Institution of Higher Education Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2622-8946>, e-mail: [1988aav@mail.ru](mailto:1988aav@mail.ru).

✉ – Для контактов / Corresponding author