

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-47-63



УДК 629.3.-17

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТЯГОВО-СЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА ЛЕСОВОЗНОГО АВТОПОЕЗДА

✉¹**Никонов Вадим Олегович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ
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», г. Воронеж, РФ

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», г. Воронеж, РФ

Аннотация.

Обоснована актуальность повышения эффективности лесовозных автопоездов за счет сокращения транспортных расходов, затрачиваемых на процесс вывозки лесоматериалов. Выполнен анализ научных работ зарубежных авторов, позволивший выявить наиболее важные факторы, оказывающие влияние на процесс эффективности вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Предложена перспективная конструкция двухкамерного сцепного устройства лесовозного автопоезда, обеспечивающая повышение энергоэффективности процесса вывозки лесоматериалов. Выполнена на основе разработанных математической модели и компьютерной программы предварительная оценка показателей эффективности предлагаемого

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF A REGENERATIVE PNEUMO-HYDRAULIC TRACTION HITCH DEVICE WOOD TRAIN

✉¹**Nikonov Vadim Olegovich**

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor 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", Voronezh, RF
e-mail: 8888nike8888@mail.ru

Posmetev Valerii Ivanovich

doctor of technical sciences, professor, professor of the department of engineering technologies Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Posmetev Viktor Valerevich

candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the department of forestry mechanization and machine design Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF

Annotation.

The relevance of increasing the efficiency of logging road trains by reducing the transport costs spent on the process of hauling timber is substantiated. The analysis of scientific works of foreign authors has been carried out, which made it possible to identify the most important factors influencing the process of the efficiency of timber hauling by timber road trains. A promising design of a two-chamber coupling device for a timber road train is proposed, which provides an increase in the energy efficiency of the timber hauling process. Based on the developed mathematical model and computer program, a preliminary assessment of the efficiency indicators of the proposed road train coupling device was carried out. It has been

цепного устройства автопоезда. Установлено, что оснащение лесовозного автопоезда рекуперативным двухкамерным сцепным устройством позволит при движении автопоезда по недостаточно обустроенной лесовозной дороге генерировать рекуперированную мощность порядка 7,8 кВт. Выявлено, что оптимальное значение диаметра двухкамерного гидроцилиндра сцепного устройства составляет 90 мм, при этом достигается максимальное значение рекуперированной мощности и минимальное значение продольного ускорения прицепа с лесоматериалами относительно лесовозного автомобиля.

Ключевые слова: ЛЕСОВОЗНЫЙ АВТОПОЕЗД, ДВУХКАМЕРНОЕ СЦЕПНОЕ УСТРОЙСТВО, ЛЕСОВОЗНАЯ ДОРОГА, РЕКУПЕРАЦИЯ, ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ, ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ АККУМУЛЯТОР, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВЫВОЗКА ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ.

established that equipping a logging road train with a recuperative two-chamber coupling device will allow generating a recuperated power of about 7.8 kW when the road train moves along an insufficiently equipped logging road. It was revealed that the optimal value of the diameter of the two-chamber hydraulic cylinder of the coupling device is 90 mm, while achieving the maximum value of the recuperated power and the minimum value of the longitudinal acceleration of the trailer with timber relative to the timber vehicle.

Keywords: TIMBER ROAD TRAIN, TWO-CHAMBER COUPLING DEVICE, FOREST ROAD, RECOVERY, HYDRAULIC ENERGY, PNEUMO-HYDRAULIC ACCUMULATOR, SIMULATION MODELING, REMOVAL OF TIMBER MATERIALS.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Лесовозный автомобильный транспорт, благодаря своей конкурентоспособности и эффективности с экономической точки зрения играет важную роль в надлежащем функционировании лесозаготовительных предприятий. Вывозка лесоматериалов лесовозными автопоездами является наиболее дорогим этапом лесозаготовительного процесса, на который приходится порядка 50 % всех затрат, расходуемых на лесозаготовку. Лесовозные дороги являются основными объектами транспортной инфраструктуры, обеспечивающими безопасный и эффективный доступ к лесу для осуществления вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Сеть лесовозных дорог должна обеспечивать доступность вывозки лесоматериалов, минимальные потребности в обслуживании и строительстве. Затраты, расходуемые на вывозку лесоматериалов лесовозными автопоездами по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам значительно выше, чем затраты, расходуемые на вывозку лесоматериалов по обустроенной лесовозной дороге. Сокращение транспортных расходов за счет повышения топливной экономичности лесовозных автопоездов в настоящее время является наиболее актуальной задачей, поскольку задействованные в процессе вывозки лесоматериалов лесовозные автопоезда потребляют большое количество топлива, стоимость которого с каждым годом неуклонно возрастает [1].

Необходимость поиска решения данной актуальной задачи подтверждается результатами исследований, опубликованных в научных работах многих зарубежных ученых, область научных интересов которых связана с повышением эффективности лесовозных автопоездов.

Teijo Palander [2] в своей работе исследовал вопрос сокращения вредных выбросов в окружающую среду за счет повышения максимально разрешенной массы лесовозных автопоездов с 60 до 76 тонн. При замене 60 тонных лесовозных автопоездов 76 тонными можно достичь не только сокращения расхода топлива и вредных выбросов в окружающую среду в интервале от 32 до 41 %, но и значительное снижение транспортных расходов. Кроме этого, увеличение количества осей у большегрузных лесовозных автопоездов способствует достижению меньшего негативного воздействия на опорную поверхность лесовозной дороги за счет более рационального соотношения массы вывозимых лесоматериалов между тягачом и прицепом.

Antti Lajunen [3] в своей работе анализирует различные способы повышения эффективности лесовозных автопоездов, задействованных в процессе вывозки лесоматериалов.

Среди этих способов, он выделяет: использование с целью снижения расхода топлива большегрузных автопоездов, либо же альтернативных видов топлива; сокращение потерь тепла в двигателе; применение гибридных технологий в работе силовых агрегатов лесовозных автопоездов, позволяющих рекуперировать энергию торможения при преодолении автопоездами затяжных спусков. На основе имитационного моделирования было выполнено сравнение расхода топлива автопоездами в зависимости от используемой гибридной конфигурации силового агрегата и их рабочего цикла. Установлено, что в сравнении с традиционным автопоездом у конфигурации лесовозного автопоезда с гибридным приводом удельный расход топлива между рабочими циклами меньше на 3 %. Наибольшее количество энергии автопоездом генерируется в режимах торможения на спусках. Накопленная в аккумуляторе электрическая энергия позволяет снизить максимальную мощность двигателя на 410 кВт. Повышение топливной экономичности гибридной конфигурации лесовозного автопоезда можно также достичь за счет оптимизации работы его гибридной системы, а также использования более рациональных стратегий управления и прогнозирования маршрутов вывозки лесоматериалов.

Ger J. Delvin и др. [4] в своей работе на основе анализа установили, что для сведения к минимуму затрат, расходуемых на содержание лесовозных дорог, вывозка лесоматериалов лесовозными автопоездами не обязательно должна осуществляться по оптимальному маршруту, приоритетом будет являться вывозка лесоматериалов по обустроенным лесовозным дорогам более высокого класса. Результаты исследования показывают, что транспортные расходы при вывозке лесоматериалов лесовозными автопоездами по обустроенным лесовозным дорогам в сравнении с оптимальным маршрутом, включающим движение по необустроенным лесовозным дорогам, будут значительно ниже, так как при этом сократятся затраты на топливо, уменьшится износ лесовозных автопоездов.

Christoph Kogler и др. [5] в своей работе установили, что эффективность самозагружающихся лесовозных автопоездов может быть повышена за счет: использования их только на короткие расстояния от лесных складов до близлежащих терминалов; оптимальной конфигурации автопарка по количеству самозагружающихся автопоездов; максимально допустимой загрузки лесовозного автопоезда. Выявлено, что увеличение количества тягачей и полуприцепов при фиксированном количестве самозагружающихся лесовозных автопоездов приводит к неуклонному увеличению объема вывозимых лесоматериалов до тех пор, пока не будет достигнута максимально возможная перевалочная способность. Дальнейшее повышение количества тягачей с прицепами приводит к росту времени ожидания в очереди, а также к росту транспортных расходов, так как отсутствует возможность перегрузить дополнительный объем лесоматериалов. Увеличение количества самозагружающихся лесовозных автопоездов способствует росту пропускной способности перевалки лесоматериалов до момента достижения максимальной пропускной способности терминала, количество самозагружающихся автопоездов на котором не превышает 13 единиц. Увеличение разрешенной полной массы лесовозных автопоездов до 50 т способствует снижению на 40 % количества задействованных на терминале самозагружающихся лесовозных автопоездов. Кроме этого, меньшее количество прибывающих на терминал самозагружающихся лесовозных автопоездов способствует сокращению времени ожидания в очереди и сокращению транспортных расходов. Повышение разрешенной полной массы самозагружающихся лесовозных автопоездов способствует снижению вредных выбросов в окружающую среду.

Grzegorz Trzcinsk, Tadeusz Moskalik, Rafal Wojtan [6] в своей работе установили, что: поддерживая одинаковый вес загрузки лесоматериалов в лесовозных автопоездах можно достичь экономии транспортных расходов в диапазоне от 4 до 14 %; увеличение предельного веса лесовозных автопоездов за счет изменения количества осей дает возможность получить в долгосрочной перспективе, как экономические, так и экологические выгоды; обоснованный выбор конфигурации лесовозных автопоездов, их полезной загруженности, а также плотности и влажности лесоматериалов с учетом их изменчивости в разные периоды года позволяет повысить эффективность процесса вывозки.

Mark Brown и Mohammad Reza Ghaffariyan [7] в своей работе установили, что на эф-

фактивность вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами оказывают влияние: полезная нагрузка, время в пути, расход топлива, влажности и плотность вывозимых лесоматериалов. Загрузка лесовозных автопоездов максимально разрешенной массой позволяет не только сократить транспортные расходы, но и повысить спрос на лесоматериалы. Недогрузка лесовозных автопоездов лесоматериалами приводит к росту стоимости вывозки, снижению прибыли лесозаготовительных предприятий, а также к увеличению количества задействованных в процессе лесовозных автопоездов. Кроме этого перегрузка лесовозных автопоездов может привести к штрафам, а также возникновению опасных дорожных ситуаций.

Paweł Kozakiewicz и др. [8] в своей работе уделили особое внимание параметрам влажности древесины, оказывающей влияние на изменение плотности и массы вывозимых лесовозными автопоездами лесоматериалов. Установлено, что знание фактического веса вывозимых лесоматериалов в соотношении с их изменяющейся в разные сезоны года влажностью позволяет предотвратить перегрузку лесовозных автопоездов.

Amanda Sosa и др. [9] в своей работе установили, что перегрузка лесовозных автопоездов в процессе вывозки лесоматериалов сопровождается снижением работоспособности лесовозных дорог, а также увеличением расхода топлива автопоездов. Выявлено, что при снижении веса лесоматериалов в лесовозном автопоезде на 10 %, его расход топлива снижается на 5-10 %. Установлено, что чем тяжелее собственный вес лесовозного автопоезда, тем меньше его полезная нагрузка. Предложено с целью снижения собственного веса автопоезда использовать имеющий меньший по массе современный гидроманипулятор, а также элементы конструкции в прицепах и полуприцепах, изготовленных из современных более легких материалов.

Abdullah E. Akay и др. [10] в своей работе установили, что на транспортные расходы в процессе вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами большое значение оказывают следующие факторы: уровень обустроенности лесовозных дорог, тип и их протяженность, уклоны и техническое состояние; время осуществления вывозки от места погрузки до места разгрузки; грузоподъемность лесовозного автопоезда, маневренность автопоезда на горизонтальных кривых различного радиуса; оптимальный маршрут вывозки, доступность проезда к погрузочным и разгрузочным площадкам. Выявлено, что лесовозные автопоезда большой грузоподъемности могут перевозить больше лесоматериалов за каждую поездку, что потенциально сокращает транспортные расходы и повышает эффективность процесса вывозки.

Claes Lofroth и др. [11] в своей работе установили, что использование для вывозки лесоматериалов модульного лесовозного автопоезда, имеющего длину 30 м и максимальную полную массу 90 тонн, дает возможность за два рейса вывести тот же объем лесоматериалов, что и три лесовозных автопоезда, массой 60 тонн. Выявлено, что использование лесовозного автопоезда такой конфигурации позволяет сократить транспортные расходы на 10 % и снизить вредные выбросы в окружающую среду на 22 %. За счет того, что вес лесоматериалов равномерно распределяется по всем осям лесовозного автопоезда, негативное воздействие на состояние лесовозной дороги было незначительным, и ухудшение безопасности дорожного движения не наблюдалось.

Marco Zoric и др. [12] в своей работе установили, что для повышения эффективности лесовозных автопоездов, эксплуатирующихся в неблагоприятных погодных условиях по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам с преобладанием большого количества уклонов, требуется: осуществлять дистанционный мониторинг изменения технического состояния основных агрегатов лесовозных автопоездов; оснащать их более мощными тяговыми двигателями; повысить уровень квалификации водителей; улучшить аэродинамические свойства лесовозных автопоездов, а также увеличить допустимую грузоподъемность.

R. Mousavi и др. [13] в своей работе установили, что для эффективной работы процесса вывозки лесоматериалов, исключения возможных задержек в ожидании погрузочно-разгрузочных работ, количество лесовозных автопоездов должно быть сбалансировано с грузоподъемностью и скоростью работы грузоподъемных механизмов. Выбор грузоподъемности и конфигурации лесовозного автопоезда зависит от размеров вывозимых лесоматериалов, состояния лесовозных дорог, наличия уклонов, крутизны склонов, от правил дорожного

движения, ограничивающих общий вес автопоездов, доступного объема лесоматериалов на нижних складах для вывозки, а также от их географического месторасположения.

Zdravko Pandur и др. [14] в своей работе установили, что необходимым условием рационального процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами является правильно спланированная и построенная сеть лесовозных дорог. При движении лесовозного автопоезда под уклон (-4%) его расход топлива снижается до 50% в сравнении с движением автопоезда по прямым участкам лесовозной дороги. При движении лесовозного автопоезда в гору ($+4\%$) его расход топлива увеличивается на 60% в сравнении с движением автопоезда по прямым участкам. При движении по участкам лесовозных дорог с уклоном ($+8\%$) расход топлива лесовозного автопоезда увеличивается в два раза.

Jukka Malinen и др. [15] в своем исследовании рассмотрели влияние на эффективность эксплуатации лесовозных автопоездов роста цен на топливо, воздействия окружающей среды, изменения правил дорожного движения, роста налогов, а также изменения давления в шинах автопоезда. Установлено, что более низкое давление в шинах лесовозного автопоезда позволяет снизить износ опорной поверхности лесовозной дороги, улучшить характеристики автопоезда с точки зрения сцепления колес с опорной поверхностью лесовозной дороги при торможении, ходовых качеств и технического обслуживания лесовозного автопоезда. Выявлено, что низкие температуры, снег, лед, метели, ливни, увеличение среднего количества осадков, сильные ветры способствуют возникновению на лесовозной дороге помех, сбоев в работе лесовозных автопоездов, а также нанесению значительного ущерба дорожной инфраструктуре, в том числе содержанию лесовозных дорог.

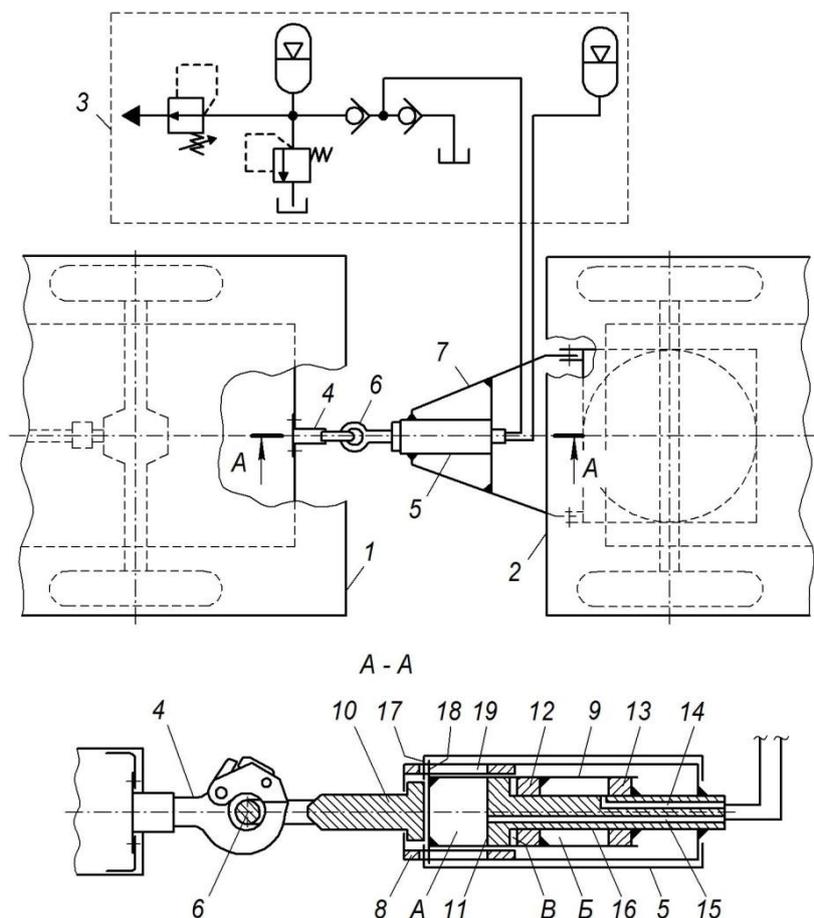
Kari Vaatainen и др. [16] на основе выполненного обзора установили, что цепочки поставок круглого леса лесовозными автопоездами и логистика поставок представляют собой сложную системную среду, которая сильно различается с точки зрения: свойств лесоматериалов, транспортной инфраструктуры, влияния погоды на систему, используемой технологии вывозки, а также хранения лесоматериалов. Выявлено, что полная масса автопоезда и полезная нагрузка оказывают прямое влияние на расход топлива и пройденное расстояние, но когда расчет переключается на расход топлива и пройденный километр, влияние становится обратным.

На основании проведенного анализа результатов исследований зарубежных ученых можно сделать вывод, что эффективность вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами во многом определяется транспортными расходами, затрачиваемыми на осуществление этого процесса. Это можно объяснить тем, что оказывая значительное влияние на конечную стоимость вывозимых лесоматериалов, транспортные расходы определяют конкурентоспособность лесозаготовительных предприятий. Подводя итог, проанализированных выше научных работ, направленных на повышение эффективности лесовозных автопоездов, можно также выделить ключевые факторы, оказывающие непосредственное влияние на изменение транспортных расходов, повышение которых негативно отражается на прибыли и конкурентоспособности лесозаготовительных предприятий. К ним относятся: максимально разрешенная масса лесовозного автопоезда; использование альтернативных видов топлива, количество осей у большегрузных автопоездов; сокращение потерь тепла в двигателе; применение гибридных технологий в работе силовых агрегатов, позволяющих рекуперировать энергию торможения при преодолении автопоездами затяжных спусков; рациональная стратегия управления и прогнозирование маршрутами вывозки лесоматериалов; сведение к минимуму затрат, расходуемых на содержание лесовозных дорог; оптимальная конфигурация автопарка по количеству самозагружающихся автопоездов; максимально допустимая загрузка автопоезда; время в пути, расход топлива; знание фактического веса вывозимых лесоматериалов в соотношении с их изменяющейся влажностью в разные сезоны года; использование деталей в конструкции прицепов и полуприцепов, изготовленных из современных легких материалов; правильно спланированная сеть лесовозных дорог, их уровень обустроенности, тип, протяженность, наличие уклонов; маневренность автопоезда на горизонтальных кривых различного радиуса; доступность проезда к погрузочным и разгрузочным площадкам; использование модульных лесовозных автопоездов, имеющих длину 30 м и полную массу 90 тонн; дистанционный мониторинг изменения технического состояния основных агрегатов лесовозных автопоездов; крутизна склонов, правила до-

рожного движения, ограничивающие общий вес автопоезда; доступный объем лесоматериалов на нижних складах, их географическое расположение; изменение давления в шинах автопоезда; низкие температуры, снег, лед, метели, ливни, увеличение среднего количества осадков, сильные ветры; логистика поставок.

Научное направление, связанное с повышением энергоэффективности транспортных средств, путем разработки и практического применения перспективных способов рекуперации различных видов энергии и устройств, используемых в конструкциях современных автомобилей, основанных на этих способах, является на сегодняшний день актуальным. С целью повышения эффективности процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами в сложных дорожных условиях, авторами предложена перспективная конструкция рекуперативного двухкамерного сцепного устройства, позволяющая за счет рекуперации гидравлической энергии сократить расход топлива автопоезда, снизить транспортные расходы и тем самым повысить конкурентоспособность лесозаготовительных предприятий (рис. 1).

Процесс рекуперации энергии предлагаемым двухкамерным сцепным устройством осуществляется при движении лесовозного автопоезда по недостаточно обустроенной лесовозной дороге в неустановившихся и переходных режимах в результате частого торможения при преодолении препятствий, уклонов и спусков. При резком торможении лесовозного автопоезда, прицеп с лесоматериалами вместе с двухкамерным сцепным устройством под действием сил



A, B, B – поршневая, штоковая и промежуточная полости; *1* – лесовозный автомобиль; *2* – прицеп; *3* – рекуперативный гидропривод; *4* – крюк; *5* – корпус; *6* – соединительная петля; *7* – дышло; *8* – подвижный цилиндр; *9* – двухкамерный цилиндр одностороннего действия; *10* – фланец; *11, 13* – поршни; *12* – неподвижная перегородка; *14, 15* – каналы; *16* – шток; *17, 18* – ограничители; *19* – сквозные пазы

Рисунок 1 – Перспективная схема рекуперативного пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства лесовозного автопоезда

инерции масс перемещается в сторону лесовозного автопоезда, что способствует при многократных повторениях генерированию и накоплению гидравлической энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе. Далее накопленная таким образом энергия рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе полезно используется в технологических процессах погрузки и разгрузки лесоматериалов. Необходимо также отметить, что практическое использование предлагаемого двухкамерного сцепного устройства позволяет повысить надежность лесовозного автопоезда за счет демпфирования знакопеременных динамических нагрузок, возникающих между прицепом с лесоматериалами и лесовозным автомобилем. Оснащение предлагаемым сцепным устройством лесовозного автопоезда обеспечивает также более благоприятные условия труда водителей, за счет улучшения плавности хода автопоезда при преодолении им встречающихся неровностей опорной поверхности лесовозной дороги.

2 Материалы и методы

В данной статье исследованы два неизученных ранее объекта. Первым является рекуперативное пневмогидравлическое двухкамерное сцепное устройство новой конструкции. Вторым объектом изучения является движение по недостаточно обустроенной поверхности лесовозной дороги лесовозного автомобиля и прицепа с большим количеством осей (4 и 5 соответственно). Для изучения данных объектов доработана ранее описанная в других научных статьях авторов математическая модель движения лесовозного автомобиля с прицепом (рис. 2) [17-20].

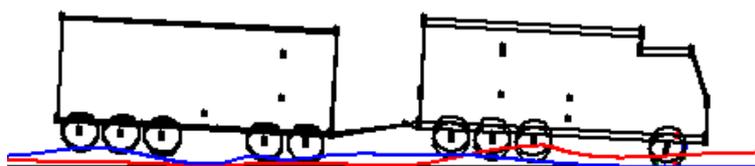


Рисунок 2 – Представление лесовозного автомобиля с 4 осями и прицепа с 5 осями в модели

Задачами теоретического исследования являются: оценка возможности оснащения лесовозного автомобиля с прицепом, предлагаемым рекуперативным пневмогидравлическим сцепным устройством; оценка рекуперативного эффекта данным устройством; определение оптимальных конструктивных параметров усовершенствованной конструкции сцепного устройства.

Аналогично, как и в ранее представленной математической модели, лесовозный автопоезд описывается в модели двумя твердыми телами (лесовозный автомобиль и прицеп), которые перемещаются в процессе моделирования, контактируя упруго-вязким взаимодействием с опорной поверхностью лесовозной дороги в трехмерном пространстве. Отличием в приведенной модели является упруго-вязкое взаимодействие колес лесовозного автопоезда с опорной поверхностью в десяти точках для прицепа, имеющего пять осей и в восьми точках для лесовозного автомобиля, имеющего четыре оси (рис. 3). Модельные лесовозный автомобиль и прицеп контактируют между собой через предлагаемое рекуперативное сцепное устройство, описываемое на расчетной схеме точками *ABC*.

В математической модели лесовозный автомобиль и прицеп обладают массами $m_{ЛА}$ и $m_{П}$ и соответствующими моментами инерции $J_{П}$ и $J_{Т}$, расчет которых осуществляется относительно текущей оси вращения и для определенного момента времени. Кроме этого, положение в пространстве лесовозного автопоезда описывается декартовыми координатами центров тяжести лесовозного автомобиля ($x_{ЛА}$, $u_{ЛА}$, $z_{ЛА}$) и прицепа ($x_{П}$, $u_{П}$, $z_{П}$), и углами отклонения локальной системы координат лесовозного автомобиля ($\varphi_{xЛТ}$, $\varphi_{yЛТ}$, $\varphi_{zЛТ}$) и прицепа ($\varphi_{xП}$, $\varphi_{yП}$, $\varphi_{zП}$). Как и в ранее разработанной математической модели движение лесовозного автомобиля с прицепом описывается системой дифференциальных уравнений. Отличительной особенностью приведенной ниже системы дифференциальных уравнений, является описание лесовозного автопоезда, включающего в себя лесовозный автомобиль с 4 осями и прицеп с 5 осями:

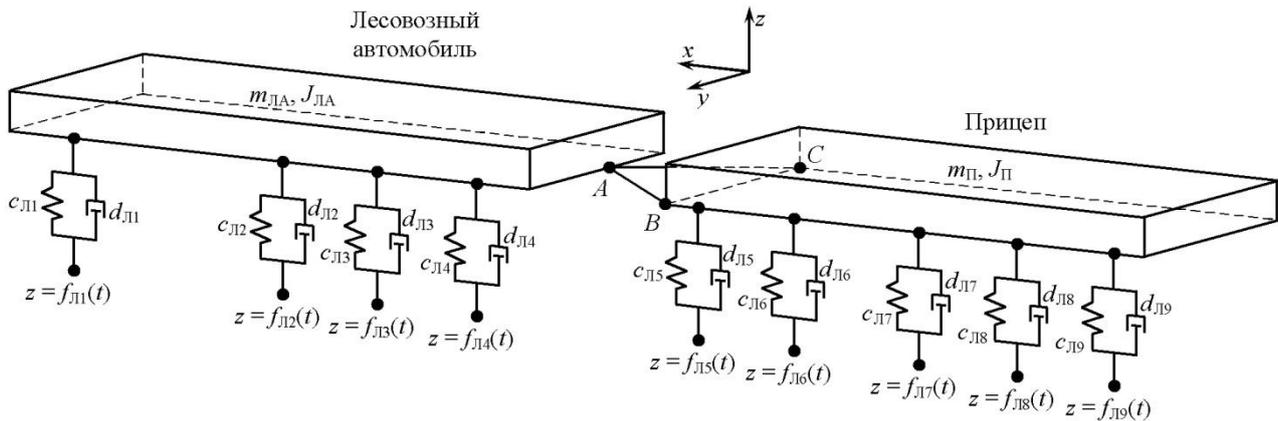


Рисунок 3 – Расчетная схема, используемая для построения динамической модели, описывающей взаимодействие звеньев автопоезда между собой и с опорной поверхностью лесовозной дороги

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{ЛА} \frac{d^2 x_{ЛA}}{dt^2} = \sum_{i=1}^3 (F_{Лi}^x + F_{Пi}^x) + F_A^x; \\ m_{ЛА} \frac{d^2 y_{ЛA}}{dt^2} = \sum_{i=1}^4 (F_{Лi}^y + F_{Пi}^y) + F_A^y; \\ m_{ЛА} \frac{d^2 z_{ЛA}}{dt^2} = -m_{ЛА} \cdot g + \sum_{i=1}^3 (F_{Лi}^z + F_{Пi}^z) + F_A^z; \\ J_{ЛАx} \frac{d^2 \varphi_{xЛA}}{dt^2} = \sum_{i=1}^4 (M^x (F_{Лi}) + M^x (F_{Пi})) + M^x (F_A); \\ J_{ЛАy} \frac{d^2 \varphi_{yЛA}}{dt^2} = \sum_{i=1}^4 (M^y (F_{Лi}) + M^y (F_{Пi})) + M^y (F_A); \\ J_{ЛAz} \frac{d^2 \varphi_{zЛA}}{dt^2} = \sum_{i=1}^4 (M^z (F_{Лi}) + M^z (F_{Пi})) + M^z (F_A); \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{П} \frac{d^2 x_{П}}{dt^2} = \sum_{i=5}^9 (F_{Лi}^x + F_{Пi}^x) + F_B^x + F_C^x; \\ m_{П} \frac{d^2 y_{П}}{dt^2} = \sum_{i=5}^9 (F_{Лi}^y + F_{Пi}^y) + F_B^y + F_C^y; \\ m_{П} \frac{d^2 z_{П}}{dt^2} = -m_{ЛА} \cdot g + \sum_{i=5}^4 (F_{Лi}^z + F_{Пi}^z) + F_B^z + F_C^z; \\ J_{Пx} \frac{d^2 \varphi_{xП}}{dt^2} = \sum_{i=5}^9 (M^x (F_{Лi}) + M^x (F_{Пi})) + M^x (F_B) + M^x (F_C); \\ J_{Пy} \frac{d^2 \varphi_{yП}}{dt^2} = \sum_{i=5}^9 (M^y (F_{Лi}) + M^y (F_{Пi})) + M^y (F_B) + M^y (F_C); \\ J_{Пz} \frac{d^2 \varphi_{zП}}{dt^2} = \sum_{i=5}^9 (M^z (F_{Лi}) + M^z (F_{Пi})) + M^z (F_B) + M^z (F_C); \end{array} \right. \quad (2)$$

где t – время; $F_{Лi}$ и $F_{Пi}$ – силы, воспринимаемые колесами лесовозного автомобиля и прицепа; 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 соответственно на лесовозный автомобиль и прицеп со стороны рекуперативного пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства; M^i – моменты сил $F_{Лi}$ и $F_{Пi}$.

Сила F_1^z , передаваемая от опорной поверхности со стороны колеса на корпус лесовозного автопоезда рассчитывалась на основании ранее разработанной упруго-вязкой модели колеса, учитывающей коэффициенты жесткости c_i и демпфирования d_i . Решение системы дифференциальных уравнений второго порядка, характеризующих движение лесовозного автомобиля с прицепом, выполняется на основании численного метода Рунге-Кутты. Численное решение таких дифференциальных уравнений осуществляется за счет дискретизации времени t на одинаковые шаги τ , длительность шага которых составляет Δt . На каждом шаге интегрирования выполняется расчет сил и моментов, воздействующих в процессе движения на корпуса лесовозного автомобиля и прицепа. Далее по заданным координатам и скоростям движения лесовозного автомобиля и прицепа на текущем шаге интегрирования выполняется расчет координат и скоростей лесовозного автомобиля и прицепа на следующем шаге интегрирования. Для исследования движения лесовозного автопоезда по опорной поверхности недостаточно обустроенной лесовозной дороги в математической модели задавался набор выступов гауссовой формы, параметры протяженности и высоты которых задавались случайным образом (рис. 4).

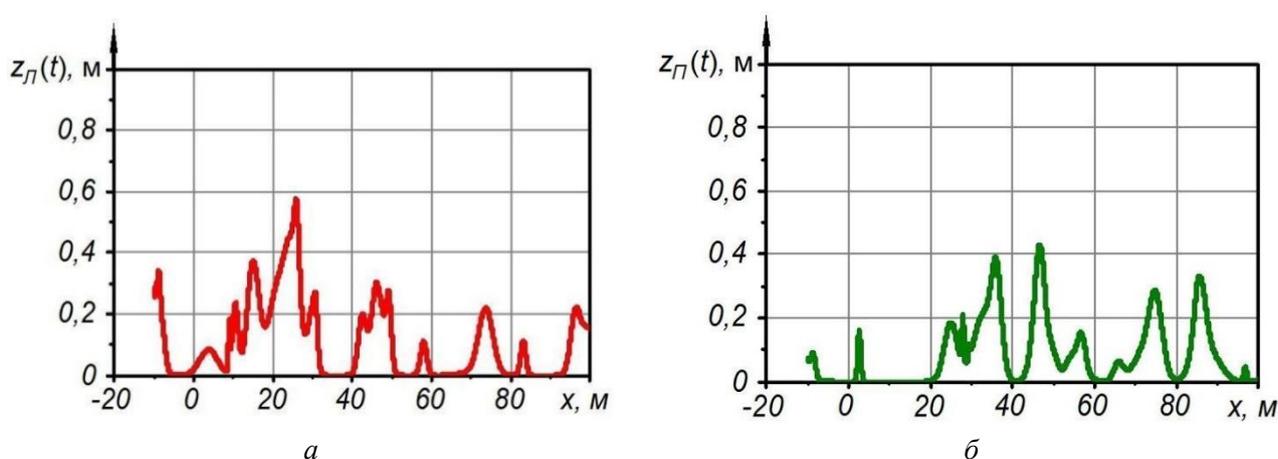


Рисунок 4 – Зависимости, характеризующие изменение рельефа опорной поверхности лесовозной дороги для колес лесовозного автопоезда левого (а) и правого бортов (б)

В соответствии с принципом работы исследуемого рекуперативного пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства, его можно представить в модели двумя основными элементами: цилиндром и штоком двухкамерного гидроцилиндра. При изменении расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом шток перемещается по отношению к стенкам гидроцилиндра, при этом изменяется объем полостей A , B , B (рис. 5).

В данной статье исследуется способность предлагаемого пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства рекуперировать энергию рабочей жидкости при движении лесовозного автопоезда.

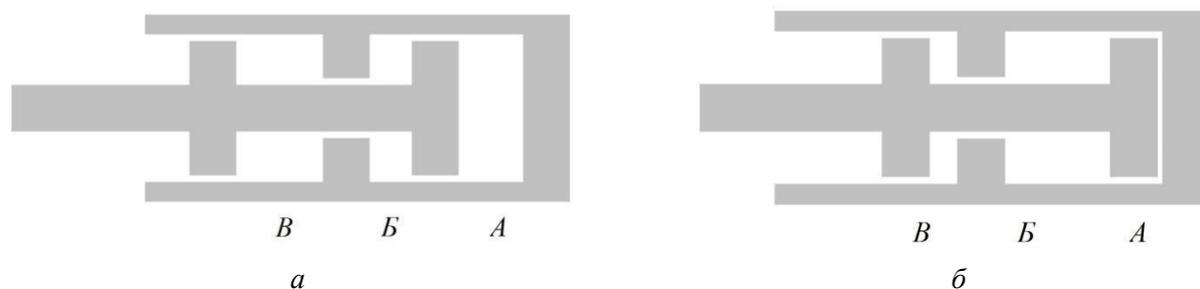


Рисунок 5 – Схематичные изображения рекуперативного пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства, выводимые программой в процессе компьютерных экспериментов при движении лесовозного автопоезда: а – исходное (равновесное) положение штока двухкамерного гидроцилиндра; б – уменьшение объема поршневой полости при увеличении или уменьшении расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом

возного автопоезда в не установившихся и переходных режимах движения по недостаточно обустроенной лесовозной дороге. Так как предлагаемое сцепное устройство в модели описывается в виде двух невесомых тяг AB и AC (рис. 3), то движение лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозной дороге с частыми торможениями и ускорениями приведет к изменению длин этих тяг и, следовательно, к модельному генерированию и накоплению энергии рабочей жидкости.

Основными показателями эффективности предлагаемого сцепного устройства в модели помимо рекуперированной мощности N_{pc} является ускорение прицепа $a_{Пс}$ в продольном направлении относительно лесовозного автомобиля. Это связано с тем, что в процессе движения лесовозного автопоезда в определенных дорожных условиях, оснащение его таким сцепным устройством может привести к снижению демпфирующих свойств устройства, способствующих возникновению и воздействию на звенья автопоезда значительных знакопеременных нагрузок.

Для последующего предварительного исследования предлагаемой конструкции сцепного устройства при движении лесовозного автопоезда по недостаточно обустроенной лесовозной дороге с учетом доработанной математической модели разработана компьютерная программа, позволяющая оценить показатели эффективности нового устройства при изменении условий движения автопоезда, параметров обустроенности лесовозной дороги, а также конструктивных параметров рекуперативного двухкамерного сцепного устройства. Интерфейсная форма вывода на экран результатов моделирования, включающая в себя схематичное изображение в трех проекциях лесовозного автомобиля с прицепом, графическое изображение изменения во времени расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом, а также значений показателей эффективности представлена на рисунке 6.

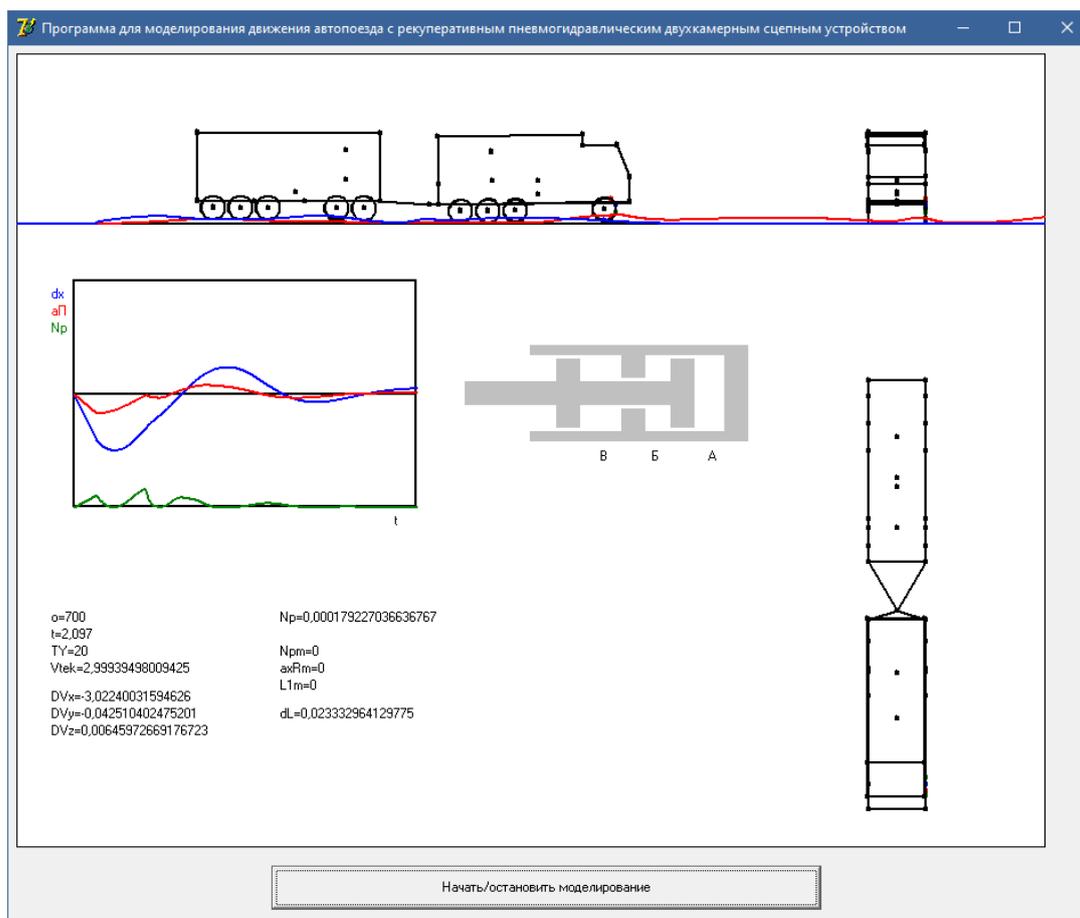


Рисунок 6 – Интерфейсная форма вывода на экран результатов моделирования движения лесовозного автопоезда, оснащенного рекуперативным пневмогидравлическим двухкамерным сцепным устройством

Для организации систематического исследования эффективности рекуперативного пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства составлена схема взаимосвязи основных входных переменных модели и показателей эффективности системы рекуперации (рис. 7). Входные переменные разделены на три группы.

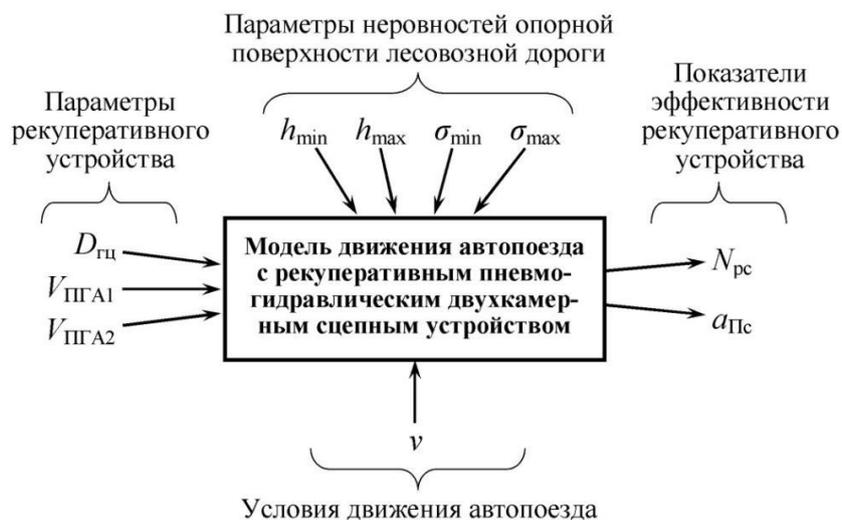


Рисунок 7 – Входные параметры и выходные характеристики разработанной математической модели

В первую группу входных переменных включены основные параметры рекуперативного сцепного устройства: значение внутреннего диаметра $D_{гц}$ двухкамерного гидроцилиндра; объемы пневмогидравлических аккумуляторов $V_{ПГА1}$, $V_{ПГА2}$, используемых для демпфирования и накопления энергии рабочей жидкости. Во вторую группу входных переменных включены основные условия движения лесовозного автопоезда, в частности его скорость движения v . В третью группу входных переменных включены основные параметры неровностей опорной поверхности лесовозной дороги: значения высот h_{min} , h_{max} и длин σ_{min} и σ_{max} , неровностей. Для оценки эффективности предлагаемого двухкамерного сцепного устройства приняты показатели рекуперированной мощности $N_{рс}$ и продольного ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля. Дальнейшее теоретическое исследование на основе серий компьютерных экспериментов сводится к выявлению зависимостей изменения показателей эффективности предлагаемого двухкамерного сцепного устройства при увеличении в заданных интервалах конструктивных параметров сцепного устройства, скорости движения автопоезда, а также параметров опорной поверхности лесовозной дороги.

3 Результаты исследования

В результате движения по недостаточно обустроенной лесовозной дороге в переходных и неустановившихся режимах лесовозный автопоезд совершает сложное поступательное движение, звенья которого остаются соединенными между собой рекуперативным пневмогидравлическим двухкамерным сцепным устройством.

В процессе движения автопоезда происходило изменение длины Δx двухкамерного сцепного устройства (рис. 8, а), что способствовало генерации и накачиванию рабочей жидкостью пневмогидравлического аккумулятора. Это позволило с помощью компьютерной программы определить значения рекуперированной мощности для заданных интервалов времени (рис. 8, б). В отдельные моменты времени, как показано на рисунке 8, б, значения мгновенной рекуперированной мощности достигали порядка 32 кВт, а значения средней рекуперированной мощности – 6 кВт. Для исследования плавности хода прицепа относительно лесовозного автомобиля в компьютерной программе рассчитывались значения мгновенного $a_{Гс}$ продольного ускорения прицепа и среднего $a_{Гс}$ продольного ускорения (рис. 8, в). При осу-

ществлении базового компьютерного эксперимента в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог, значение мгновенного продольного ускорения достигало $3,3 \text{ м/с}^2$. Тем не менее усредненное значение мгновенного продольного ускорения на пути 100 м было не велико и составило $0,93 \text{ м/с}^2$. Последующие компьютерные эксперименты заключались в исследовании влияния на показатели эффективности предлагаемого двухкамерного сцепного устройства увеличения диаметра гидроцилиндра, скорости движения лесовозного автопоезда, а также параметров неровностей опорной поверхности лесовозной дороги.

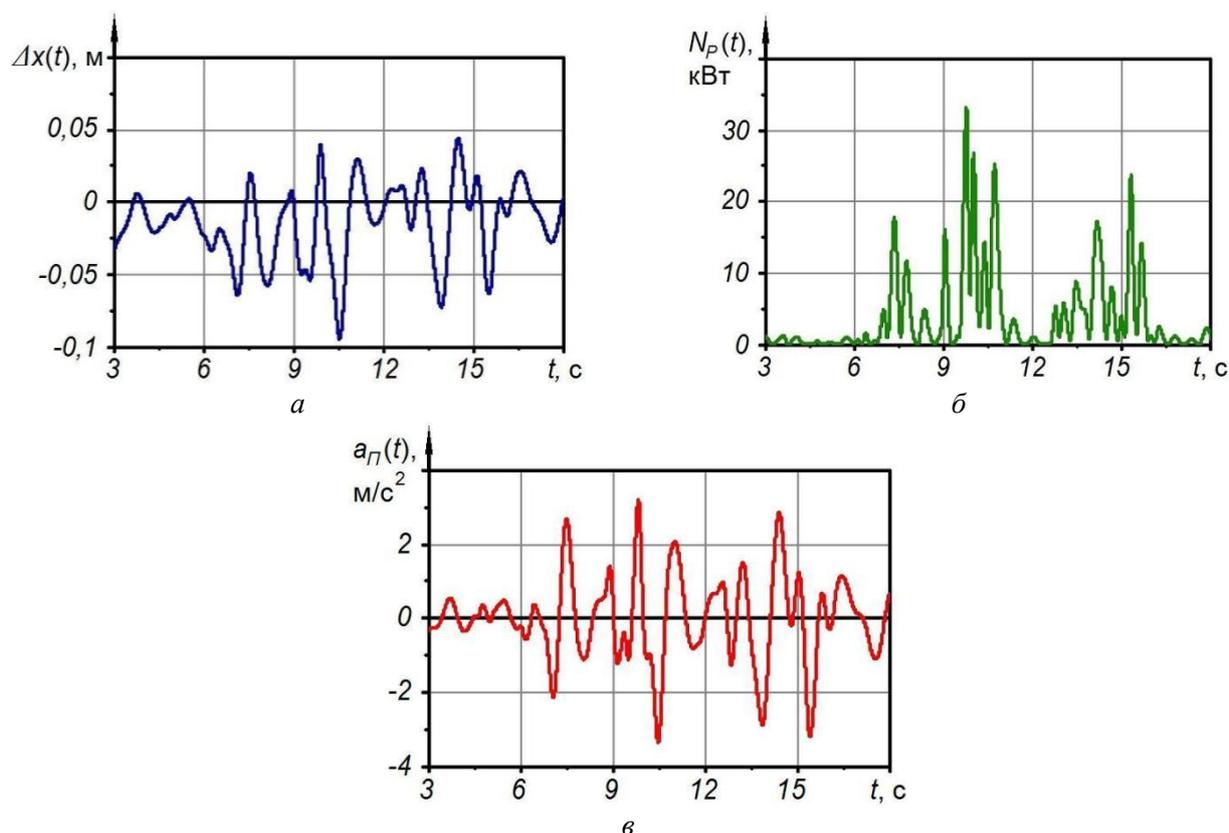


Рисунок 8 – Зависимости, характеризующие изменение во времени t смещения Δx (а) штока гидроцилиндра, значения рекуперированной мощности N_p (б) и продольного ускорения a_{Π} (в) прицепа относительно лесовозного автомобиля

От диаметра двухкамерного гидроцилиндра в рекуперативном пневмогидравлическом сцепном устройстве, с одной стороны, зависит интенсивность генерирования и поступления рабочей жидкости в пневмогидравлический аккумулятор. С другой стороны, диаметр двухкамерного гидроцилиндра определяет демпфирующие свойства рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства, и слишком большой его диаметр способствует возникновению жесткой связи между лесовозным автомобилем и прицепом, характеризующейся появлением в процессе движения по недостаточно обустроенной лесовозной дороге значительных по величине динамических воздействий. Для установления зависимостей изменения исследуемых показателей эффективности при увеличении значения диаметра двухкамерного гидроцилиндра $D_{\text{гц}}$ были выполнены серии компьютерных экспериментов, при осуществлении которых диаметр двухкамерного гидроцилиндра $D_{\text{гц}}$ увеличивался с шагом 10 мм в интервале 50-100 мм.

Было установлено, что при слишком малом диаметре двухкамерного гидроцилиндра 50-70 мм он оказывает слабый демпфирующий эффект, накачивает рабочую жидкость с малой интенсивностью, поэтому рекуперированная мощность составляет незначительную величину 3,2 ... 5,6 кВт (рис. 9, а). При этом прицеп движется по отношению к лесовозному автомобилю с большей по величине амплитудой, но относительно незначительным ускорением $0,55 \dots 0,78 \text{ м/с}^2$ (рис. 9, б). При слишком большом диаметре двухкамерного гидроцилиндра

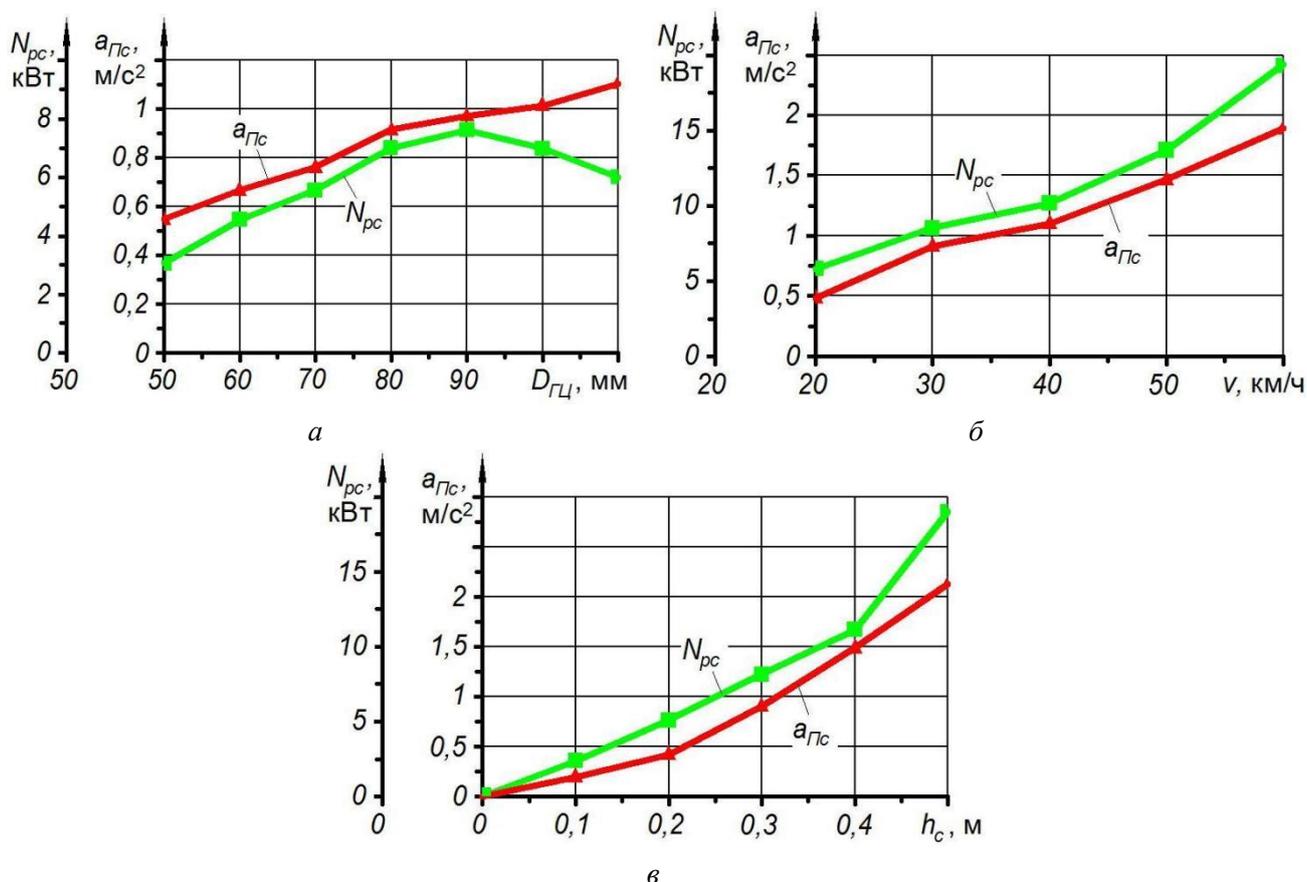


Рисунок 9 – Зависимости изменения показателей эффективности N_{pc} , $a_{ГЛс}$ предлагаемого сцепного устройства при увеличении диаметра $D_{ГЦ}$ двухкамерного гидроцилиндра (а), скорости v движения лесовозного автопоезда (б), высоты h_c неровностей опорной поверхности лесовозной дороги (в)

100-110 мм демпфирующий эффект устройства рекуперации также снижается, так как с увеличением площади двухкамерного гидроцилиндра увеличивается сопротивление продольному перемещению прицепа по отношению к лесовозному автомобилю. Вследствие этого рекуперированная мощность сравнительно мала – 5,9 ... 7,1 кВт (рис. 9, а). Значение продольного ускорения прицепа относительно лесовозного автопоезда из-за высокой жесткости сцепного устройства изменяется в диапазоне от 1,1 до 1,21 м/с². Таким образом, оптимальной величиной можно считать диаметр двухкамерного гидроцилиндра, равный примерно 90 мм, при котором достигается максимум рекуперированной мощности 7,8 кВт при приемлемом ускорении прицепа 0,97 м/с².

Скорость v движения лесовозного автопоезда по неровной опорной поверхности лесовозной дороги влияет на интенсивность колебаний штока двухкамерного гидроцилиндра в пневмогидравлическом сцепном устройстве, поэтому скорость v движения автопоезда будет оказывать существенное влияние на значение рекуперированной мощности N_{pc} . Тем не менее, с ростом скорости движения лесовозного автопоезда происходит рост интенсивности колебаний прицепа относительно лесовозного автомобиля, что в свою очередь оказывает существенное влияние на повышение значения продольного ускорения прицепа относительно лесовозного автопоезда.

Для установления зависимостей изменения исследуемых показателей эффективности при увеличении значения скорости v движения лесовозного автопоезда были выполнены серии компьютерных экспериментов, при осуществлении которых скорость v движения лесовозного автопоезда увеличивалась с шагом 10 км/ч в интервале 20-60 км/ч.

С увеличением скорости движения лесовозного автопоезда средняя рекуперированная

мощность увеличивается по закону, близкому к квадратичному (рис. 9, б). В то же время, увеличение скорости движения лесовозного автопоезда сопровождается увеличением среднего продольного ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля по практически линейному закону (рис. 9, б).

Система рекуперации остается эффективной, обеспечивая довольно высокие значения рекуперированной мощности 5,2 ... 7,3 кВт при движении с малой скоростью 20 ... 30 км/ч, и обеспечивая высокие значения рекуперированной мощности 10,1 ... 13,2 кВт при движении с довольно высокой скоростью 40 ... 50 км/ч при приемлемом значении продольного ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля 1,1 ... 1,5 м/с². С ростом неровностей опорной поверхности лесовозной дороги происходит увеличение интенсивности колебаний прицепа относительно лесовозного автомобиля, способствующей повышению рекуперированной мощности генерируемой предлагаемым пневмогидравлическим двухкамерным сцепным устройством.

Для установления зависимостей изменения исследуемых показателей эффективности при увеличении значения высоты неровностей h_c опорной поверхности лесовозной дороги, были выполнены серии компьютерных экспериментов, при осуществлении которых значения высоты неровностей h_c увеличивались с шагом 0,1 м в интервале 0-0,5 м. При этом результаты экспериментов показали, что с увеличением средней высоты неровностей h_c увеличивается средняя рекуперированная мощность N_{pc} приблизительно по квадратичному закону (рис. 9, в). Среднее продольное ускорение прицепа относительно лесовозного автомобиля увеличивается так же, по закону, близкому к квадратичному, однако при значительном росте высоты неровностей его темп замедляется (рис. 9, в). Таким образом, предлагаемая система рекуперации остается эффективной в широком диапазоне высот неровностей от 0,1 до 0,5 м, обеспечивая рекуперированную мощность в пределах 2,6 ... 16,8 кВт, соответственно. При высотах неровностей выше 0,5 м, лесовозный автопоезд испытывает чрезмерно высокие ускорения превышающие 2,2 м/с², вследствие чего ему целесообразно двигаться со скоростью не более 30 км/ч.

4 Обсуждение и заключение

Выполненный анализ научных работ зарубежных авторов позволил заключить, что эффективность вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами во многом определяется транспортными расходами, затрачиваемыми на осуществление этого процесса. Анализ исследуемых работ также позволил выявить основные факторы, от которых во многом зависит эффективность процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. С целью повышения энергоэффективности процесса вывозки лесоматериалов разработана перспективная конструкция двухкамерного сцепного устройства, обеспечивающая сокращение транспортных расходов за счет повышения надежности автопоезда и улучшения его топливной экономичности.

Для предварительной оценки разработанной конструкции устройства доработана математическая модель движения по неровной опорной поверхности лесовозной дороги лесовозного автопоезда, состоящего из четырехосного лесовозного автомобиля-тягача и пятиосного прицепа, позволяющая оценить возможность рекуперации энергии с помощью пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства в различных режимах движения и изучить влияние параметров рекуперативного устройства на его эффективность. Разработана компьютерная программа для исследования на основе компьютерных экспериментов эффективности функционирования рекуперативного пневмогидравлического двухкамерного сцепного устройства. Установлено, что оснащение лесовозного автопоезда предлагаемым двухкамерным сцепным устройством с оптимальным рабочим диаметром двухкамерного гидроцилиндра 90 мм, достигается максимум средней рекуперированной мощности 7,8 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа составляет приемлемую величину 0,97 м/с².

Предлагаемое рекуперативное двухкамерное сцепное устройство достаточно эффективно как при движении по лесовозной дороге с малой скоростью в интервале 20 ... 30 км/ч, обеспечивая довольно высокие значения рекуперированной мощности в диапазоне от 5,2 до 7,3 кВт, так и при движении с довольно высокой скоростью 40 ... 50 км/ч, обеспечивая высокие значения реку-

перуемой мощности 10,1 ... 13,2 кВт при приемлемом значении среднего продольного ускорения 1,1 ... 1,5 м/с². С повышением скорости движения лесовозного автомобиля с прицепом по недостаточно обустроенной лесовозной дороге рекуперированная мощность увеличивается ориентировочно по квадратичному закону. Предлагаемая система рекуперации остается эффективной в широком диапазоне высот неровностей от 0,1 до 0,5 м, обеспечивая рекуперированную мощность в пределах 2,6 ... 16,8 кВт, соответственно. При высотах неровностей выше 0,5 м, лесовозный автопоезд испытывает чрезмерно высокие ускорения, превышающие 2,2 м/с², вследствие чего целесообразно двигаться со скоростью не более 30 км/ч.

Список литературы

1 Никонов, В. О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта / В. О. Никонов ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2021. – 202 с. – *Библиогр.* : с. 181-202 (196 назв.).

2 Teijo Palander The environmental emission efficiency of larger and heavier vehicles – A case study of road transportation in Finnish forest industry / Teijo Palander // *Journal of Cleaner Production* 155 (2017) 57-62. – *Библиогр.* : p. 62 (33 titles). – DOI 10.1016/j.jclepro.2016.09.095.

3 Antti Lajunen Fuel economy analysis of conventional and hybrid heavy vehicle combinations over real-world operating routes / Antti Lajunen // *Transportation Research Part D* 31 (2014) 70-84. – *Библиогр.* : pp. 83-84 (44 titles). – DOI 10.1016/j.trd.2014.05.023.

4 Ger. J. Devlin Timber haulage routing in Ireland: an analysis using GIS and GPS / Ger. J. Devlin, Kevin McDonnell, Shane Ward // *Journal of Transport Geography* 16 (2008) 63-72. – *Библиогр.* : p. 72 (26 titles). – DOI 10.1016/j.jtrange.2007.01.008.

5 Christoph Kogler Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain / Christoph Kogler, Alexander Stenitzer, Peter Rauch // *Forests* 2020, 11, 1245 15 p. – *Библиогр.* : pp. 14-15 (27 titles). – DOI 10.3390/f11121245.

6 Grzegorz Trzcinski Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo / Grzegorz Trzcinski, Tadeusz Moskalik, Rafal Wojtan // *Forests* 2018 9 164 12 p. – *Библиогр.* : pp. 10-12 (40 titles). – DOI 10.3390/f9040164.

7 Mark Brown Timber track payload management with different in-forest weighing strategies in Australia / Mark Brown, Mohammad Reza Ghaffariyan // *Croat. j. for. eng.* 37 (2016) 1 pp. 131-138. – *Библиогр.* : pp. 137-138 (17 titles).

8 Pawel Kozakiewicz Importance of the Moisture Content of Large-Sized Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Round wood in its Road Transport / Pawel Kozakiewicz, Lukasz Tymendorf, Grzegorz Trzcinski // *Forests* 2021, 12, 879 13 p. – *Библиогр.* : pp. 12-13 (36 titles). – DOI 10.3390/f122070879.

9 Amanda Sosa Improving log loading efficiency for Improved sustainable transport within the Irish forest and Biomass Sectors / Amanda Sosa, Radomir Klvac, Enda Coates, Tom Kent, Ger Devlin // *Sustainability* 2015 7 3017-3030. – *Библиогр.* : pp. 3028-3030 (34 titles). – DOI 10.3390/su7033017.

10 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. – *Библиогр.* : pp. 257-258 (20 titles). – DOI 10.5552/crojfe.2021.851.

11 Cloes Lofroth Ett – a modular system for forest transport / Cloes Lofroth, Lena Larsson, Johanna Enstrom, Lennart Cider, Gunnar Svenson, John Aurell, Alfred Johansson, Thomas Asp // *HVT12 : 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 2012.* – 18 p. – *Библиогр.* : p. 18 (14 titles).

12 Marko Zoric Potroshja goriva I emisija staklenickih plinova pri kamionskom prijevozu drva u hrvatskom sumarstvu / Marko Zoric, Marijan Susnjarić, Zdravko Pandur, Kristijan Mihaljević // *Nova meh. sumar.* 35 (2014) pp. 89-97. – *Библиогр.* : p. 96 (22 titles).

13 R. Mousavi Time consumption and productivity analysis of timber trucking using two kinds of trucks in northern Iran / R. Mousavi, R. Naghdi // Journal of Forest science 59 2013 (5) 211-221. – *Bibliogr.* : pp. 220-221 (22 titles).

14 Zdravko Pandur Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Milly and Mountainous Forest Roads / Zdravko Pandur, Hrvoje Neveceral, Marijan Susnjar, Marin Basic, Krno Lepoglavec // Forestist 2021. – *Bibliogr.* : pp. 9-10 (31 titles). – DOI 10.5152/forestist.2021.21012.

15 Jukka Malinen Prospects and Challenges of Timber Trucking in a Changing Operational Environment in Finland / Jukka Malinen, Ville Nousiaunen, Kari Palojarvi, Teijo Palander // Croat. j. for. eng. 35 (2014) 1 pp. 91-100. – *Bibliogr.* : pp. 99-100 (22 titles).

16 Kari Vaatainen Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden / Kari Vaatainen, Perttu Anttila, Lars Elisson, Johanna Routa // Croat. j. for. eng. 42 (2021) 1 pp. 39-61. – *Bibliogr.* : pp. 54-61 (190 titles). – DOI 10.5552/crojfc.2021.803.

17 V I Posmetev, V O Nikonov and V V Posmetev Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer // Lesnoy Zhurnal (Russian forestry journal), 2019, № 4. – pp. 108-123. – *Bibliogr.*: pp. 120-121. (20 titles). – DOI 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 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 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 10.34220/2311-8873-2022-70-85.

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]. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "VGLTU". – Voronezh, 2021. – 202 p. (In Russ.).

2 Teijo Palander The environmental emission efficiency of larger and heavier vehicles – A case study of road transportation in Finnish forest industry. Journal of Cleaner Production 155 (2017) 57-62 : doi : 10.1016/j.jclepro.2016.09.095.

3 Antti Lajunen Fuel economy analysis of conventional and hybrid heavy vehicle combinations over real-world operating routes. Transportation Research Part D 31 (2014) 70-84 : doi : 10.1016/j.trd.2014.05.023.

4 Ger. J. Devlin, Kevin McDonnel, Shane Ward Timber haulage routing in Ireland : an analysis using GIS and GPS. Journal of Transport Geography 16 (2008) 63-72 : doi : 10.1016/j.jtrange.2007.01.008.

5 Christoph Kogler, Alexander Stenitzer, Peter Rauch Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. Forests 2020, 11, 1245 15 p. : doi : 10.3390/f11121245.

6 Grzegorz Trzcinski, Tadeusz Moskalik, Rafal Wojtan 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 : 10.3390/f9040164.

7 Mark Brown, Mohammad Reza Ghaffariyan Timber track payload management with different in-forest weighing strategies in Australia. Croat. j. for. eng. 37 (2016) 1 pp. 131-138.

8 Pawel Kozakiewicz, Lukasz Tymendorf, Grzegorz Trzcinski 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 : 10.3390/f122070879.

9 Amanda Sosa, Radomir Klvac, Enda Coates, Tom Kent, Ger Devlin Improving log loading efficiency for Improved sustainable transport within the Irish forest and Biomass Sectors. Sustainability 2015 7 3017-3030 : doi : 10.3390/su7033017.

10 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.

11 Cloes Lofroth, Lena Larsson, Johanna Enstrom, Lennart Cider, Gunnar Svenson, John Aurell, Alfred Johansson, Thomas Asp Ett – a modular system for forest transport. HVTT12 : 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 2012. – 18 p.

12 Marko Zoric, Marijan Susnjar, Zdravko Pandur, Kristijan Mihaljevic Potroshja goriva I emisija staklenickih plinova pri kamionskom prijevozu drva u hrvatskom sumarstvu. Nova meh. sumar. 35 (2014) pp. 89-97.

13 R. Mousavi, R. Naghdi Time consumption and productivity analysis of timber trucking using two kinds of trucks in northern Iran. Journal of Forest science 59 2013 (5) 211-221.

14 Zdravko Pandur, Hrvoje Neveceral, Marijan Susnjar, Marin Bacic, Kruno Lepoglavec Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Milly and Mountainous Forest Roads. Forestist 2021 : doi : 10.5152/forestist.2021.21012.

15 Jukka Malinen, Ville Nousiaunen, Kari Palojarvi, Teijo Palander Prospects and Challenges of Timber Trucking in a Changing Operational Environment in Finland. Croat. j. for. eng. 35 (2014) 1 pp. 91-100.

16 Kari Vaatainen, Perttu Anttila, Lars Elisson, Johanna Routa Roundwood and Biomass Logistics in Finland and. Croat. j. for. eng. 42 (2021) 1 pp. 39-61 : doi : 10.5552/crojfc.2021.803.

17 V I Posmetev, V O Nikonov and V V Posmetev 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 : 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: 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 : 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 : 10.34220/2311-8873-2022-70-85. 10.34220/2311-8873-2022-70-85.