



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОВОЗНОГО АВТОПОЕЗДА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ПНЕВМО-ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА

Посметьев Валерий Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ

✉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

Сизьмин Игорь Валерьевич

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

Аннотация.

Обоснована необходимость использования с целью повышения производительности вывозки лесоматериалов, лесовозных автомобилей с прицепами. Описаны преимущества применения лесовозных автомобилей с прицепами перед одиночными лесовозными автомобилями. Выполнен анализ научных работ зарубежных авторов в области повышения эффективности лесовозных автомобилей с прицепами. Произведена оценка эксплуатации лесовозных автомобилей с прицепами в существующих условиях вывозки лесоматериалов в РФ. Выявлены негативные факторы ограничивающие эффек-

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE FOREST TRADING BY USING A RECUPERATIVE PNEUMATIC HYDRAULIC COUPLING DEVICE

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

✉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

Sizmin Igor Valerevich

post-graduate student of department 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

Annotation.

The necessity of using timber trucks with trailers in order to increase the productivity of hauling timber has been substantiated. The advantages of using timber trucks with trailers over single timber trucks are described. The analysis of scientific works of foreign authors in the field of increasing the efficiency of timber trucks with trailers is carried out. An assessment was made of the operation of timber trucks with trailers in the existing conditions for the transportation of timber in the Russian Federation. The negative factors limiting the efficiency of timber-carrying road trains are

тивность лесовозных автопоездов. Выделен наиболее существенный фактор, который может привести к опасным последствиям, заключающийся в возникновении при резком торможении в сцепном устройстве лесовозного автопоезда критически больших усилий. Рассмотрено изменение тормозных сил мостов лесовозного автомобиля с прицепом при резком торможении, а также три возможных случая взаимодействия при торможении лесовозного автомобиля с прицепом. Предложена перспективная конструкция рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства для лесовозного автомобиля с прицепом.

Ключевые слова: ЛЕСОВОЗНЫЙ АВТОМОБИЛЬ, ПРИЦЕП, ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СЦЕПНОЕ УСТРОЙСТВО, РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЛЕСОВОЗНАЯ ДОРОГА, ПРОЦЕСС ТОРМОЖЕНИЯ.

revealed. The most significant factor, which can lead to dangerous consequences, is highlighted, which consists in the emergence of critically large forces in the coupling device of a timber road train during sudden braking. Changes in the braking forces of the bridges of a logging vehicle with a trailer during sharp braking, as well as three possible cases of interaction when braking a logging vehicle with a trailer, are considered. A promising design of a recuperative pneumohydraulic coupling device for a timber truck with a trailer has been proposed.

Keywords: FOREST VEHICLE, TRAILER, PNEUMATIC HYDRAULIC HITCH DEVICE, ENERGY RECOVERY, EFFICIENCY, FOREST ROAD, TOR-BRAIN PROCESS.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Анализируя современное состояние вывозки лесоматериалов во всем мире и на территории РФ, можно отметить, что важнейшим средством повышения производительности труда на автомобильном транспорте в сложных дорожных условиях, является применение лесовозных автопоездов, в частности лесовозных автомобилей с прицепами. Это объясняется тем, что им, в сравнении с одиночными лесовозными автомобилями, присущи следующие специфические особенности, способствующие более предпочтительному использованию в процессе вывозки лесоматериалов: применение прицепов дает возможность повысить грузоподъемность и вместимость лесовозного автопоезда без значительного усложнения его конструкции, а также с большей эффективностью задействовать в работе мощность двигателя автопоезда; себестоимость изготовления прицепов, затраты на их техническое обслуживание и ремонт существенно ниже, а надежность в сравнении с лесовозным автомобилем одинаковой грузоподъемности выше за счет отсутствия сложных агрегатов и систем; делимость лесовозного автомобиля с прицепом, позволяющая в зависимости от предлагаемого маршрута вывозки лесоматериалов, дорожных и климатических условий использовать для вывозки лесоматериалов или одиночный лесовозный автомобиль, или лесовозный автомобиль с прицепом, и тем самым добиваться наибольшей производительности лесовозного транспортного средства, а также сокращения простоев, связанных с погрузочно-разгрузочными работами. На основании выделенных преимуществ использование лесовозных автомобилей с прицепами дает возможность значительно улучшить экономические показатели вывозки лесоматериалов в сравнении с одиночными лесовозными автомобилями. Применение лесовозных автомобилей с прицепами позволяет поднять производительность труда водителей примерно в два раза, чем при использовании одиночных лесовозных автомобилей, уменьшив тем самым потребность в числе водителей. При этом себестоимость вывозки лесоматериалов снижается на 25-30 % в зависимости от расстояния вывозки, а расход топлива на тонну вывозимых лесоматериалов уменьшается примерно на 40 %. При использовании прицепов для вывозки лесоматериалов можно снизить нагрузку на ось, что благоприятно отразится на сроке службы дорожного покрытия лесовозной дороги [1, 2, 3].

Преимущества использования лесовозных автомобилей с прицепами также подтверждаются многими научными исследованиями зарубежных авторов.

Teijo Palander [4] в своей работе на основе метода синхронизированных расчетов исследовал влияние различных по грузоподъемности лесовозных автомобилей с прицепами на количество вредных выбросов в окружающую среду. Выявлено, что даже использование для вывозки лесоматериалов лесовозных автомобилей с прицепами общей массой 76 тонн в сравнении с лесовозным автопоездом меньшей грузоподъемности 60 тонн позволяет снизить количество вредных выбросов в окружающую среду на 6,2 %.

Trzcinski Grzegorz и др. [5] в своей работе исследовали влияние влажности различных пород вывозимых лесоматериалов на изменение распределения массы по осям лесовозных автомобилей с прицепами. Выявлено, что общий вес лесовозных автопоездов зависит от веса порожнего автопоезда и веса вывозимых лесоматериалов. Кроме этого, обнаружено, что с изменением влажности лесоматериалов полная масса лесовозных автопоездов заметно различается и превышает в большинстве случаев допустимые действующими правилами дорожного движения значения. Наиболее значительное различие массы лесоматериалов с различной влажностью наблюдалось в осенний сезон заготовки лесоматериалов. Также результаты исследования показали, что у пятиосных лесовозных автомобилей с прицепами в сравнении с шестиосными нагрузка на оси распределяется равномернее.

Marijan Susnjar и др. [6] в своей работе исследовали на основе разработанной измерительной переносной платформы влияние массы вывозимых лесоматериалов на осевые нагрузки в лесовозном автомобиле с прицепом. Выявлено, что для повышения массы перевозимых лесоматериалов лесовозным автомобилем с прицепом необходимо использовать при изготовлении прицепа и гидравлического манипулятора современные более легкие материалы.

Zdravko Pandur и др. [7] в своей работе исследовали процесс изменения расхода топлива лесовозных автомобилей с прицепами при их движении с лесоматериалами и без них по лесовозным дорогам с различными продольными уклонами. Выявлено, что при движении незагруженного лесоматериалами лесовозного автомобиля с прицепом с уклоном лесовозной дороги 9,5 %, расход топлива составляет 1,6 л/км, при уклоне 3,5 % – 0,7 л/км. При движении загруженного лесоматериалами лесовозного автопоезда без уклона лесовозной дороги, расход топлива составляет 1,21 л/км, при уклоне 8 % – 3 л/км. Лесовозный автомобиль с прицепом с номинальной загрузкой лесоматериалами потребляет в среднем в 2,5 раза больше топлива на той же лесовозной дороге с исследуемым уклоном по сравнению с незагруженным лесовозным автомобилем с прицепом. Кроме этого определено, что количество вредных выбросов в несколько раз меньше при движении груженого лесовозного автомобиля с прицепом вниз по склону по сравнению с движением этого же лесовозного автопоезда вверх по склону.

Claes Lofroth и др. [8] в своей работе исследовали эффективность лесовозного автомобиля с прицепом общей длиной 30 м, максимальной полной массой 90 тонн. Выявлено, что такой лесовозный автопоезд за два рейса может перевести такой же объем лесоматериалов, что и три традиционных 60 тонных лесовозных автомобилей с прицепами. Вредные выбросы у исследуемого лесовозного автопоезда на 20 % ниже, износ лесовозной дороги не увеличивается, так как вся масса лесоматериалов равномерно распределена по большому количеству осей автопоезда, причем негативного воздействия на безопасность дорожного движения не выявлено.

Maks Brown и др. [9] в своей работе исследовали нагрузки на осях лесовозных автомобилей с прицепами, которые варьировались от 0,5 до 6, 4 тонн. Выявлено, что в большинстве случаев лесовозные автомобили с прицепами в процессе вывозки лесоматериалов недогружаются, что приводит к существенному увеличению финансовых затрат на данный процесс лесозаготовительными предприятиями. Предлагается для повышения эффективности вывозки использовать более точные методы взвешивания лесовозных автопоездов на погрузочных площадках перед их отправкой.

R. Mousavi и др. [10] в своей работе выполнили анализ затрат времени, а также изменения производительности лесовозных автомобилей с прицепами в процессе вывозки лесомате-

риалов. На основании разработанных моделей выявлено, что на производительность вывозки лесоматериалов оказывает влияние множество факторов (состояние дорожного покрытия лесовозной дороги, ее крутизна, загруженность лесовозного автопоезда, техническое состояние автопоезда, время погрузки-разгрузки и пребывание автопоезда в ремонте и т.д.). Планирование и оптимизация маршрутов вывозки лесоматериалов лесовозными автомобилями с прицепами позволит сократить время и упростить процесс учета затрат вывозки лесоматериалов, а также уменьшить количество факторов, оказывающих влияние на этот процесс.

Grzegorz Trzcinski и др. [11] в своей работе исследовали эффективность вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами различной компоновки. Выявлено, что недостаточная обустроенность лесовозных дорог не позволяет вывозить по ним лесоматериалы с загруженностью лесовозных автопоездов на каждую ось 120-150 кН. Предлагается с целью уменьшения повреждаемости лесовозных дорог, сократить количество ездов и уменьшить, таким образом расход топлива и вредных выбросов, увеличить количество осей лесовозных автомобилей с прицепами, снизить массу автопоезда за счет регулировки давления в шинах, а также использовать оптимальные логистические маршруты вывозки.

Perttu Anttila и др. [12] в своей работе исследовали потенциальную потерю полезной нагрузки лесовозными автомобилями с прицепами в процессе вывозки лесоматериалов в сложных погодных условиях, характеризующихся снегопадами. Выявлено, что максимальная потеря полезной нагрузки лесовозных автомобилей с прицепами колебалась в интервале от 1560 до 3100 кг. Потеря полезной нагрузки увеличивалась с понижением температуры, повышением относительной влажности и увеличением количества осадков. Предложено усовершенствовать конструкцию лесовозного автомобиля с прицепом в направлении уменьшения налипания снега.

Marco Zoric и др. [13] в своей работе исследовали на основе дистанционного мониторинга влияние технических характеристик узлов и агрегатов лесовозных автомобилей с прицепами, стиля вождения, состояния поверхности лесовозной дороги на расход топлива, от которого во многом зависят как затраты на вывозку лесоматериалов, так и конечная их стоимость. Авторы рекомендуют кроме новых организационных решений применять для снижения расхода топлива и вредных выбросов лесовозными автомобилями с прицепами новые технические решения, основанные на использовании электро- и гидроприводов.

Выполненный анализ научных статей зарубежных исследователей позволяет заключить, что эффективность функционирования лесовозных автомобилей с прицепами во многом зависит от: технического состояния и технических характеристик лесовозного автомобиля с прицепом; загруженности лесовозного автопоезда; грузоподъемности и равномерности распределения веса лесоматериалов по осям лесовозного автопоезда; влажности вывозимых лесоматериалов; стиля вождения, погодных условий и маршрута вывозки лесоматериалов; времени погрузки и разгрузки лесоматериалов, а также времени пребывания лесовозных автопоездов в ремонте; обустроенности лесовозных дорог, количества уклонов, подъемов, спусков, их параметров на лесовозной дороге.

В этой связи оценка использования лесовозных автомобилей с прицепами в существующих условиях вывозки лесоматериалов в РФ позволяет определить негативные факторы, ограничивающие эффективность их работы, и на этой основе предложить возможные перспективные технические решения, способствующие сведению к минимуму выявленных негативных последствий. Целью исследования в данной статье является оценка использования лесовозных автомобилей с прицепами в существующих условиях вывозки лесоматериалов, а также разработка перспективной конструкции сцепного устройства для лесовозного автомобиля с прицепом.

2 Материалы и методы

В представленной научной статье авторами был выполнен анализ эмпирических исследований российских и зарубежных ученых, занимающихся повышением эффективности лесовозных автомобилей с прицепами, функционирующими в сложных природно-климатических и дорожных условиях, путем разработки и использования, как организационных, так и перспективных конструктивно-технологических решений. Поиск научных статей

осуществлялся в поисковых системах, научных электронных библиотеках, а также библиографических базах: MDPI (www.mdpi.com), Scopus (www.scopus.com), Web of Science (access.clarivate.com), eLIBRARY.RU (www.elibrary.ru). Кроме этого, в качестве литературных источников использовались научные труды на русском языке, глубина поиска которых начиналась с 1940 г. Основными ключевыми словами в процессе выполнения поисковых запросов выступали: лесовозный автомобиль, лесовозная дорога, прицеп, вывозка лесоматериалов, сцепное устройство, рекуперация энергии, производительность, эффективность.

3 Результаты исследований

Лесовозные автомобили с прицепами приспособлены преимущественно для движения по лесовозным дорогам постоянного и временного действия, которые должны за счет прочного, надежного основания и ровности поверхности обеспечивать бесперебойное, круглогодичное, безопасное движение лесовозных автопоездов с расчетными скоростями, осевыми нагрузками в различных климатических условиях и в течение всего срока службы. Средняя скорость движения по обустроенной лесовозной дороге лесовозного автомобиля с прицепом в процессе вывозки лесоматериалов может изменяться в диапазоне от 50 до 85 км/ч [14].

В существующих условиях вывозки лесоматериалов лесовозные автомобили с прицепами вынуждены большую часть пути перемещаться по лесовозным дорогам. Их особенностями, помимо множества поворотов, значительных по величине крутых поперечных уклонов, подъемов и спусков, являются наличие на них многочисленных неровностей в виде колеи, гребенки, выбоин, пучин, трещин, морозных пучений, а также различных единичных и древесных препятствий в виде спиленных заподлицо с поверхностью почвы пней, отдельных кустарников, древесной поросли, поваленных деревьев, порубочных остатков, выхода скальных пород, камней, валунов, водных преград, и поверхностей, покрытых кочками. Значение средней скорости движения лесовозного автомобиля с прицепом по недостаточно обустроенной лесовозной дороге составляет от 15 до 25 км/ч. Для эффективного функционирования лесозаготовительных предприятий лесовозные автомобили с прицепами должны двигаться в процессе вывозки лесоматериалов по лесовозной дороге со средней скоростью движения 30-50 км/ч, преодолевая за одну рабочую смену около 300-500 км.

Недостаточный уровень обустроенности лесовозных дорог связан с тем, что основные лесовозные дороги для вывозки лесоматериалов были построены около 30 лет назад и за этот период изменились нагрузки на оси лесовозных автомобилей в сторону увеличения. Кроме этого, в отрасли практически прекратилось строительство качественных лесовозных дорог круглогодичного действия. Это вызвано тем, что: лесовозные дороги окупаются лишь при достаточно больших объемах вывозки лесоматериалов, а эффективность процесса лесозаготовки зависит не только от компактного расположения лесосек, но и от высокой концентрации производства; крупные лесозаготовительные предприятия распались на более мелкие и значительно снизили объемы заготовок лесоматериалов; доминирующее положение в отрасли в настоящее время занимают небольшие лесозаготовительные предприятия, для которых осуществление реконструкции и строительства новых лесовозных дорог постоянного действия, является очень затратным процессом; качество лесовозных дорог (их капиталоемкость) регулируется спросом на лесоматериалы – уровнем закупочных цен, при низких ценах лесозаготовитель вынужден экономить на лесовозных дорогах применяя наиболее простые их типы (грунтовые и зимние); в местных массивах, пройденных в прошлом рубками с помощью временных лесовозных дорог, в настоящее время практически отсутствуют обустроенные лесовозные дороги [15, 16].

Недостаточный уровень обустроенности лесовозных дорог, является существенным сдерживающим фактором, ограничивающим максимально эффективное использование лесовозных автомобилей с прицепами в процессе вывозки ими лесоматериалов. Движение лесовозных автомобилей с прицепами по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам сопровождается следующими негативными последствиями: низким сцеплением колес с опорной поверхностью лесовозной дороги, ограниченной видимостью, увеличением сопротивления движения и расхода топлива; снижением плавности и средней скорости движения по причинам чрезмерно высоких уско-

рений подрессоренной части; воздействием значительных линейных и угловых колебаний, способствующих возникновению динамических нагрузок и оказывающих влияние на узлы и агрегаты лесовозного автомобиля с прицепом; возрастанием физических усилий водителя при управлении лесовозным автопоездом, ухудшением условий его труда; вследствие запредельных динамических нагрузок часто происходят необратимые изменения технического состояния в деталях и узлах лесовозного автомобиля с прицепом, существенно снижающие их надежность; ухудшением устойчивости лесовозного автомобиля с прицепом, а также безопасности движения (средняя скорость движения лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозной дороге составляет примерно 21-33 % от возможной максимальной скорости движения лесовозного автопоезда); увеличение примерно в два раза расхода топлива, сопровождающееся возрастанием более чем в два раза общей себестоимости вывозки лесоматериалов, что естественно ведет к существенному увеличению конечной стоимости доставляемых лесоматериалов потребителю; при движении прицепа с лесоматериалами по лесовозной дороге, когда его левое переднее и правое заднее колеса находятся на разном уровне, цельные (неразрезные) оси подвержены перекосам, величина которых зависит от упругости рессор, шин, скручивания рамы и кузова и зазоров в подвеске осей и в поворотном устройстве (эти перекосы осей достигают $10-12^{\circ}$ и могут явиться причиной поломок кузова и рамы); влиянием лесовозного автомобиля с прицепом; увеличением вертикальных нагрузок на переднюю ось прицепа от вертикальных слагающих усилий, передаваемых прицепу с лесоматериалами тяговым лесовозным автомобилем; возникновением в лонжеронах рамы растягивающих усилий в горизонтальном направлении и изгибающих от вертикальных нагрузок; появление изгибающих усилий, обусловленных моментами от пары сил, которые тем больше, чем выше преодолеваемое препятствие; ослаблением заклепочных соединений в раме тягача. Все это в совокупности также приводит к снижению срока службы лесовозного автомобиля с прицепом более чем в два раза [17].

Одним из ответственных узлов лесовозного автомобиля с прицепом, оказывающим влияние на безопасность дорожного движения, является сцепное устройство. Большой зазор в сцепном устройстве между крюком и петлей лесовозного автопоезда при его движении по лесовозной дороге приводит к частым ударным воздействиям и вилянию прицепа с лесоматериалами. При этом усилия резко меняются по величине и направлению, в результате чего происходит усиленный износ сцепного устройства, расшатываются крепления рамы и задней подвески лесовозного автомобиля, а также узлы прицепа с лесоматериалами. Значительное изнашивание зева крюка снижает его прочность и может привести к поломке. Зазор в паре крюк – петля постоянно увеличивается при эксплуатации, что приводит к увеличению поперечных колебаний прицепа с лесоматериалами, особенно заметных при движении лесовозного автомобиля с прицепом со скоростью свыше 40 км/ч.

При движении лесовозного автомобиля с прицепом в процессе вывозки лесоматериалов по лесовозной дороге, сопровождающемся различными переходными процессами происходит возникновение значительных усилий в его сцепном устройстве от динамического воздействия на лесовозный автомобиль прицепа с лесоматериалами. Вследствие того, что тормозные и динамические силы, возникающие в процессе движения лесовозного автомобиля с прицепом являются функцией времени и изменяются по линейному закону, жесткость упругой связи и имеющиеся зазоры в сцепном устройстве оказывают значительное влияние на величину крюкового усилия, проявляющегося в виде динамических воздействий, снижающих скорость движения лесовозного автомобиля с прицепом.

В работе Игитова Ш. М. [18] выявлено, что основными причинами выхода из строя сцепных устройств грузовых автомобилей с прицепами является не только износ, но и поломки демпфирующих элементов. Износ и поломки возникают в большинстве случаев в результате перегруженности грузовых автомобилей с прицепами, а также воздействия динамических нагрузок, возникающих при движении автопоездов по недостаточно обустроенным дорогам. Наиболее часто встречающимися дефектами сцепных устройств грузовых автомобилей с прицепами являются: трещины и износ втулок сцепного устройства, износ и потеря упругости, отрыв сцепной петли, усадка и поломка пружин, износ отверстий крепления и

трещин в раме автомобиля, износ и срез резьбы центрального винта, отрыв болтов крепления сцепного устройства к раме грузового автомобиля, износ штока сцепного устройства.

В процессе движения грузового автомобиля с прицепом по дороге наиболее негативные воздействия оказывают режимы движения с резким ускорением и торможением автопоезда. Они сопровождаются воздействием высоких нагрузок на сцепное устройство из-за свободных продольных колебаний грузового автомобиля и прицепа, оказывающих разрушительное воздействие на элементы конструкции сцепного устройства, а также способствующих возникновению поломок.

Замедление лесовозного автомобиля с прицепом может быть определено на основании приведенной на рисунке 1 схемы сил, действующих на лесовозный автопоезд в процессе торможения с учетом угла α продольного уклона лесовозной дороги.

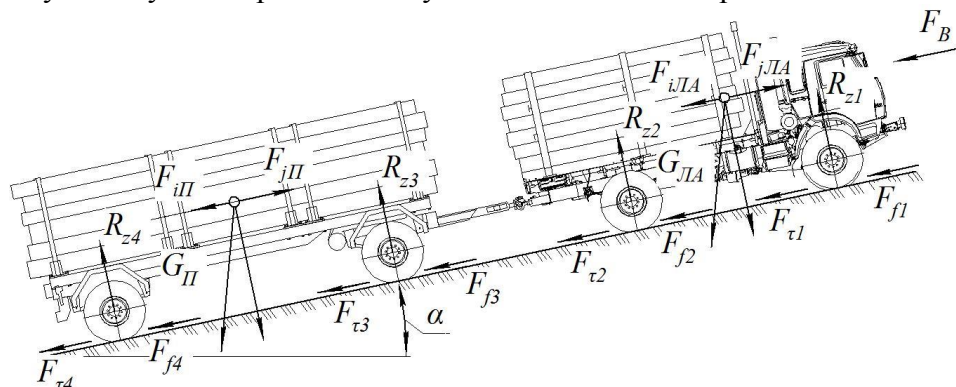


Рисунок 1 – Силы, действующие на лесовозный автомобиль с прицепом при торможении

В процессе построения схемы сил принимаются допущения о симметричности всех сил, действующих на лесовозный автомобиль с прицепом, а также о том, что в продольно плоскости лесовозный автомобиль и прицеп не имеют относительных перемещений. В процессе торможения лесовозный автомобиль с прицепом движется под действием сил инерции F_{ja} и F_{jn} , зависящих от инерции поступательно движущихся и вращающихся масс лесовозного автомобиля с прицепом [2]:

$$F_{jx} = F_{ja} + F_{j\Pi} = \left(m_{ЛА} + m_{\Pi} + \frac{\sum I_{к.ЛА}}{r_{0ЛА}} + \frac{\sum I_{к.П}}{r_{0П}} \right) \cdot a_{xт}, \quad (1)$$

где $m_{ЛА}$ – масса лесовозного автомобиля; m_{Π} – масса прицепа; $\sum I_{к.ЛА}$, $\sum I_{к.П}$ – суммы моментов инерции колес лесовозного автомобиля и прицепа соответственно; $r_{0ЛА}$ – радиус качения без скольжения колес лесовозного автомобиля; $r_{0П}$ – радиус качения без скольжения колес прицепа; $a_{xт}$ – замедление движения лесовозного автомобиля с прицепом при торможении.

По аналогии с торможением одиночного лесовозного автомобиля сила инерции определяется по формуле:

$$F_{jx} = \delta_{ЛА+П} \cdot a_x \cdot m_{ЛА+П}, \quad (2)$$

где $\delta_{ЛА+П}$ – коэффициент учета вращающихся масс:

$$\delta_{ЛА+П} = 1 + \left(\frac{\sum I_{к.ЛА}}{r_{0ЛА}} + \frac{\sum I_{к.П}}{r_{0П}} \right) \cdot \frac{1}{m_{ЛА+П}}, \quad (3)$$

где $m_{ЛА+П}$ – масса лесовозного автомобиля с прицепом; $\frac{\sum I_{к.ЛА}}{r_{0ЛА}}$ – приведенные массы колес

лесовозного автомобиля; $\frac{\sum I_{к.П}}{r_{0П}}$ – приведенные массы колес прицепа.

У лесовозных автомобилей с прицепами приведенные массы колес значительно меньше массы всего лесовозного автомобиля с прицепом. В этой связи, в большинстве расчетов коэффициент учета вращающихся масс $\delta_{ЛА+П}$ принимается, равным единице.

Силами сопротивления движению лесовозному автомобилю с прицепом являются: F_g – сила сопротивления воздуха; F_f – сила сопротивления качению; F_τ – тормозная сила: $F_\tau = F_{\tau 1} + F_{\tau 2} + F_{\tau 3} + F_{\tau 4}$; F_i – сила сопротивления подъему: $F_i = F_{iЛА} + F_{iП}$.

В случае, если лесовозный автомобиль с прицепом выполняет торможение на спуске, сила сопротивления подъему является движущей. При торможении без блокировки колес тормозные силы на мостах лесовозного автомобиля с прицепом пропорциональны тормозным моментам:

$$F_{\tau i} = \frac{M_{\tau i}}{r_{0i}}. \quad (4)$$

При торможении с блокировкой колес тормозные силы ограничиваются сцеплением колес с опорной поверхностью лесовозной дороги:

$$F_{\tau i} = \varphi \cdot R_{zi}, \quad (5)$$

где R_{zi} – нормальная реакция, действующая на мост в i положении.

Значения действующих сил находятся по формулам:

$$\begin{aligned} F_f &= f \cdot g \cdot m_{ЛА+П}; \quad F_i = i \cdot g \cdot m_{ЛА+П}; \\ F_B &= k_B \cdot A_B \cdot v^2; \quad F_{\tau i} = \gamma_{\tau i} \cdot R_z, \end{aligned} \quad (6)$$

где f – коэффициент сопротивления качению; i – коэффициент сопротивления подъему; k_B – коэффициент сопротивления воздуха; $\gamma_{\tau i}$ – удельная тормозная сила на i -м мосту.

Скорость лесовозного автомобиля с прицепом в процессе торможения V_τ и тормозной путь S_τ могут быть найдены по известным зависимостям [2]:

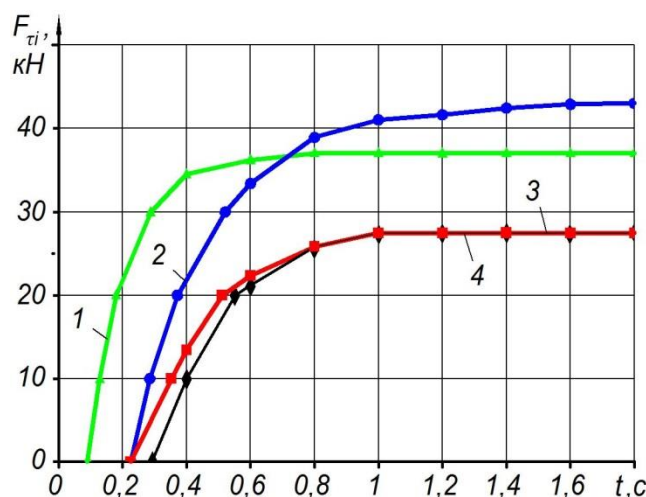
$$V_\tau = V_0 - \int a_\tau dt; \quad s_\tau = \int V_\tau dt. \quad (7)$$

Важной особенностью процесса торможения лесовозного автомобиля с прицепом является неодновременность срабатывания тормозных механизмов различных мостов, оказывающая значительное влияние на характер нарастания замедления и устойчивость лесовозного автомобиля с прицепом. На рисунке 2 показаны зависимости замедления во времени лесовозного автомобиля с прицепом и действующие на его мостах тормозные силы.

Направление и значение усилия в сцепном устройстве зависят от параметров лесовозного автомобиля и прицепа, а также от характера нарастания тормозных сил на мостах лесовозного автомобиля с прицепом.

Тормозные силы лесовозного автомобиля и прицепа можно выразить через удельные тормозные силы лесовозного автомобиля $\gamma_{\tauЛА}$ и прицепа $\gamma_{\tauП}$:

$$\begin{aligned} F_{\tau 1} + F_{\tau 2} &= \gamma_{\tauЛА} g m_{ЛА}; \quad F_{\tau 3} = \gamma_{\tauП} g m_{П}; \\ F_c &= -a_\tau m_{ЛА} + \gamma_{\tauП} g m_{П}; \\ F_c &= a_\tau m_{ЛА} - \gamma_{\tauЛА} g m_{ЛА}; \\ F_c &= g \frac{m_{ЛА} m_{П}}{m_{П} + m_{ЛА}} (\gamma_{\tauП} + \gamma_{\tauЛА}). \end{aligned} \quad (8)$$



1, 2 – тормозные силы переднего и заднего мостов лесовозного автомобиля;
3, 4 – тормозные силы переднего и заднего мостов прицепа с лесоматериалами

Рисунок 2 – Зависимости изменение тормозных сил мостов лесовозного автомобиля с прицепом при резком торможении

Из выражений (8) видно, что сила взаимодействия лесовозного автомобиля и прицепа зависит от их удельных тормозных сил. Возможны три случая: $\gamma_{\tau\Pi} = \gamma_{\tau\text{ЛА}}$ – торможение лесовозного автомобиля и прицепа осуществляется синхронно (усилие в сцепном устройстве отсутствует); $\gamma_{\tau\Pi} > \gamma_{\tau\text{ЛА}}$ – усилие в сцепном устройстве отрицательное (прицеп тормозит лесовозный автомобиль); $\gamma_{\tau\Pi} < \gamma_{\tau\text{ЛА}}$ – усилие в сцепном устройстве положительное (прицеп накатывается на лесовозный автомобиль).

Для лесовозного автомобиля с прицепом, рассмотренный выше первый случай является идеальным: обеспечивается высокая эффективность его торможения и достаточно хорошая устойчивость. Однако его трудно обеспечить технически вследствие того, что массы лесовозного автомобиля и прицепа в процессе эксплуатации изменяются значительно. Во втором случае в процессе торможения наблюдается растяжка лесовозного автомобиля с прицепом, что практически исключает его складывание. Однако этот случай на начальном этапе торможения возможен только при искусственном увеличении времени срабатывания тормозного привода лесовозного автомобиля. На этапе установившегося торможения в этом случае возрастает вероятность блокировки колес прицепа. При блокировке колеса перестают воспринимать боковые силы, что может привести к боковому сползанию прицепа, а затем и всего лесовозного автопоезда. В связи с этим тормозные системы лесовозных автомобилей с прицепами проектируют обычно таким образом, чтобы в процессе торможения наблюдалось некоторое набегание прицепа на лесовозный автомобиль (третий случай).

Значение силы в сцепном устройстве, возникающей при торможении лесовозного автомобиля с прицепом, можно рассматривать как один из оценочных критериев его устойчивости. Наименьшее значение силы в сцепном устройстве при высокой эффективности торможения получается при синхронном торможении всех мостов прицепа. Снижение силы в сцепном устройстве при торможении снижает вероятность складывания лесовозного автомобиля с прицепом, но не исключает ее, поскольку, как уже отмечалось, при блокировке задних колес лесовозного автомобиля сопротивление его развороту резко уменьшается [2].

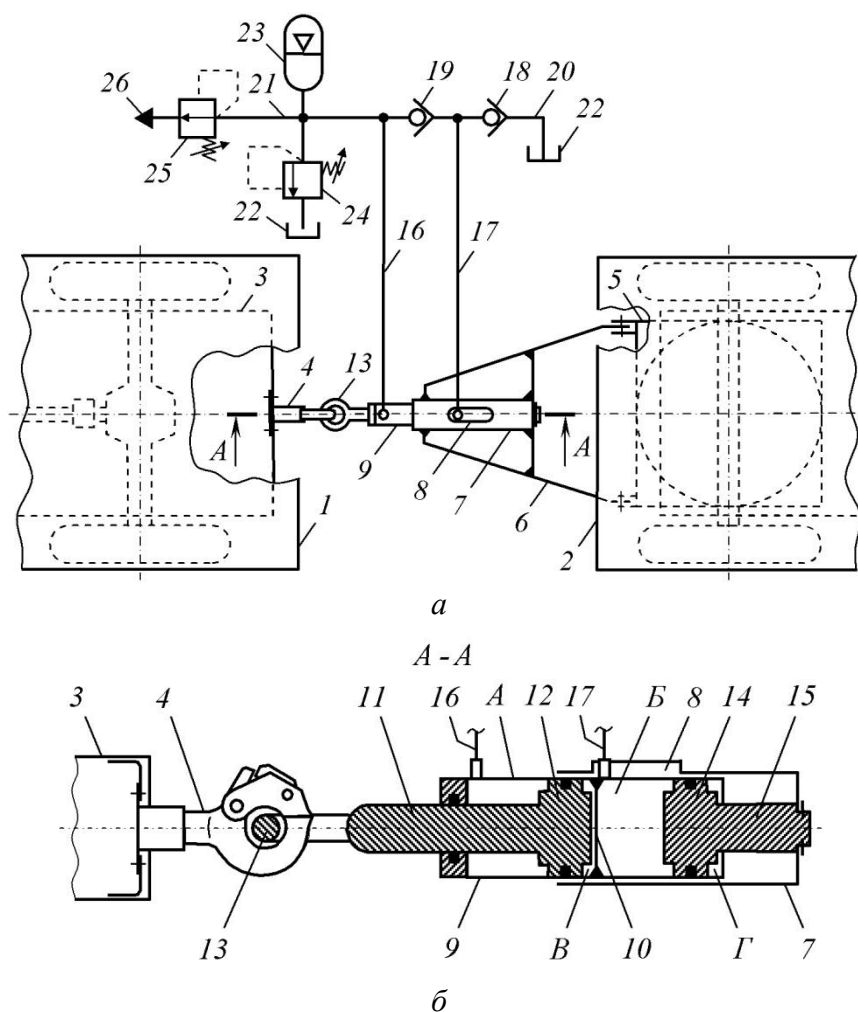
В результате этого, можно заключить, что наибольшее негативное воздействие при движении лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозной дороге воспринимает сцепное устройство лесовозного автопоезда. Это приводит к серьезным последствиям и ограничениям достижения высоких показателей эффективности вывозки лесовозными автопоездами лесоматериалов. Выявленное противоречие делает актуальным решение задачи по повышению эффективности лесовозного

автомобиля с прицепом при его движении в процессе вывозки лесоматериалов по лесовозной дороге за счет разработки перспективной конструкции сцепного устройства.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами по лесовозным дорогам, является применение в их конструкции более совершенных конструкций сцепных устройств, основанных на демпфировании и рекуперации гидравлической энергии [19-28].

Множественные исследования, выполненные ранее авторами, позволили с целью повышения эффективности лесовозных автомобилей с прицепами, функционирующих в сложных дорожных и природно-климатических условиях, разработать перспективную конструкцию пневмогидравлического сцепного устройства, схема которого приведена на рисунке 3.

Работа предлагаемого устройства основана на использовании кинетической энергии, возникающей в сцепном устройстве от сил инерции масс лесовозного автомобиля и прицепа при



а – схема рекуперативного гидропривода сцепного устройства; *б* – схема сцепного устройства;
 1 – лесовозный автомобиль; 2 – прицеп; 3 – рама; 4 – крюк; 5 – поворотная рама; 6 – дышло;
 7 – корпус цилиндрической формы; 8 – продольный паз; 9 – гидроцилиндр; 10 – герметичная перегородка; 11, 15 – штоки гидроцилиндров амортизационного и рекуперативного механизмов;
 12, 14 – поршни; 16, 17, 20, 21 – гибкие, всасывающий, напорный трубопроводы; 18, 19 – обратные клапаны; 22 – гидробак; 23 – пневмогидравлический аккумулятор; 24 – регулируемый предохранительный клапан; 25 – регулируемый редукционный клапан; 26 – присоединительный порт потребителя рекуперированной рабочей жидкости; А, Б, В, Г – полости гидроцилиндра

Рисунок 3 – Предлагаемое рекуперативное пневмогидравлическое сцепное устройство для лесовозного автомобиля с прицепом

многочисленных ускорениях, торможениях, переключении передач, движении в процессе вывозки лесоматериалов по лесовозной дороге. Рекуперативное пневмогидравлическое сцепное устройство позволяет преобразовывать кинетическую энергию масс лесовозного автопоезда в потенциальную для ее последующего использования в гидравлическом манипуляторе для погрузочно-разгрузочных работ. Кроме этого, эффективность сцепного устройства хорошо адаптирована к воздействию на лесовозный автомобиль с прицепом таких факторов, как недостаточная обустроенность лесовозных дорог, профессионализм водителя, синхронность торможения всеми колесами, а также степень изношенности шин.

Практическое использование сцепного устройства дает возможность повысить эффективность лесовозного автомобиля с прицепом за счет следующего: снижения расхода топлива благодаря рекуперации энергии рабочей жидкости; повышения надежности лесовозного автомобиля с прицепом вследствие демпфирующих свойств гидросистемы сцепного устройства и, соответственно, снижения динамических нагрузок на лесовозный автомобиль и прицеп; обеспечения как в ручном, так и в автоматическом режимах оптимальные параметры силовой и динамической характеристик устройства; улучшения плавности хода при движении лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозным дорогам и, таким образом, создания более благоприятные условия труда водителю; упрощения конструкции сцепного прибора лесовозного автомобиля с прицепом путем его замены на простой по устройству крюк и, как следствие, снизить ее стоимость. Кроме этого, предлагаемое сцепное устройство может применяться не только для автопоездов, задействованных в лесозаготовительной отрасли, но и для грузовых автомобилей с прицепами, используемых в строительном комплексе страны.

4 Обсуждение и заключение

На основании выполненного исследования в данной статье можно сделать следующие выводы. Лесовозные автомобили с прицепами имеют в сравнении с одиночными лесовозными автомобилями существенные преимущества, что обуславливает их предпочтительное использование для вывозки лесоматериалов. Выполненный анализ научных работ зарубежных авторов подтверждает актуальность необходимости повышения эффективности лесовозных автомобилей с прицепами при их функционировании в процессе вывозки лесоматериалов по лесовозным дорогам. Существующие условия вывозки лесоматериалов в РФ, характеризующиеся недостаточной обустроенностью лесовозных дорог, значительно ограничивают эффективность использования лесовозных автомобилей с прицепами. Из всех рассмотренных в статье негативных последствий, проявляющихся при движении лесовозных автопоездов по лесовозным дорогам, выделено наиболее значимое негативное последствие снижающее эффективность автопоезда, заключающееся в возникновении при частых торможениях и переходных процессах на лесовозной дороге больших усилий в сцепном устройстве, сопровождающихся выходом их из строя, а также опасными последствиями, связанными со складыванием автопоезда. Проведенный анализ сил, действующих на лесовозный автомобиль с прицепом при торможении, с учетом присущих лесовозному автопоезду одновременному срабатыванию тормозных механизмов позволил рассмотреть три возможных случая взаимодействия лесовозного автомобиля с прицепом. При движении лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозной дороге характерен третий случай взаимодействия лесовозного автомобиля с прицепом и возникновением в сцепном устройстве положительного усилия.

С целью снижения негативного воздействия от больших усилий, возникающих при торможении лесовозного автопоезда в сцепном устройстве авторами предложено рекуперативное пневмогидравлическое сцепное устройство. Для ускорения процесса создания опытного образца предлагаемого сцепного устройства требуется:

- выполнить анализ условий движения лесовозного автомобиля с прицепом в процессе вывозки лесоматериалов по различным типам и уровням обустроенности лесовозных дорог, определить в качестве исходных данных размерные характеристики неровностей и препятствий различных типов;
- разработать математическую модель движения лесовозного автомобиля с прицепом,

оснащенным новым сцепным устройством в различных переходных процессах вывозки лесоматериалов, учитывающую геометрические параметры неровностей лесовозной дороги, технико-эксплуатационные характеристики лесовозного автопоезда, усилия, возникающие в сцепном устройстве, демпфирование нагрузок, а также рекуперацию энергии рабочей жидкости в рекуперативном пневмогидравлическом сцепном устройстве;

– разработать программу для ЭВМ в наглядной форме показывающую функционирование нового сцепного устройства при исследовании различных переходных процессов, как при движении лесовозного автопоезда по недостаточно обустроенной лесовозной дороге, так и по полноценной лесовозной дороге и предусматривающую возможность получения зависимостей функциональных связей между рабочими и конструктивными параметрами предлагаемого сцепного устройства, а также нахождения количественных показателей их эффективности и аналитических зависимостей режимов работы сцепного устройства;

– на основании разработанной математической модели и программы для ЭВМ определить допустимые режимы движения лесовозного автомобиля с прицепом, оснащенного предлагаемым рекуперативным сцепным устройством, а также обосновать оптимальные конструктивные параметры предлагаемого сцепного устройства;

– разработать методику лабораторных исследований и полевых испытаний, спроектировать и изготовить опытный образец предлагаемого сцепного устройства, обеспечивающего повышение надежности лесовозного автомобиля с прицепом, снижение расхода топлива, повышение плавности хода, улучшение условий труда водителей, за счет уменьшения динамических нагрузок, действующих на основные элементы конструкции лесовозного автопоезда;

– получить результаты экспериментального исследования при торможении лесовозного автомобиля с прицепом и его движении по лесовозной дороге и их влияние на показатели эффективности предлагаемого сцепного устройства, отличающиеся высокой точностью, а также объективностью за счет обоснованного выбора фиксируемых параметров и более полного учета многофакторных воздействий внешней среды;

– разработать рекомендации по рациональной эксплуатации предлагаемого рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства.

Список литературы

1 Трофимов, В. И. Автомобильные прицепы / В. И. Трофимов // Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва, 1953. – 180 с. – *Библиогр.* : с. 166 (10 назв.).

2 Автомобили : Специализир. Подвижной состав : Учеб. пособие / М. С. Высоцкий, А. И. Гришкевич, Л. Х. Гилелес и др.; под. ред. М. С. Высоцкого, А. И. Гришкевича. – Мн. : Выш. шк., 1989. – 240 с. – *Библиогр.* : с. 237 (15 назв.).

3 Туревский, И. С. Теория автомобиля : учебное пособие / И. С. Туревский. – Москва : Высшая школа, 2005. – 240 с. – *Библиогр.* : с. 237 (18 назв.).

4 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. – *Bibliogr.*: pp. 62. (32 titles). – DOI 10.1016/j.jclepro.2016.09.095.

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

6 Marijan Susnjar Axle Load Determination of Truck with Trailer and Truck with Semitrailer for Wood Transportation / Šušnjar Marijan, Horvat Dubravko, Pandur Zdravko, Zorić, Marko // *Croatian journal of forest engineering (1845-5719)* 32 (2011), 1 379-388. – *Bibliogr.*: pp. 386-387. (11 titles).

7 Zdravko Pandur Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Hilly and Mountainous Forest Roads / Zdravko Pandur, Hrvoje Nevečerel, Marijan Šušnjar, Marin Bačić, Krno Lepoglavec // *Forestist*, August 27, 2021. – *Bibliogr.*: pp. 9-10. (31 titles). – DOI 10.5152/for-

estist.2021.21012.

8 C. Löfroth Ett – a modular system for forest transport a three-year roundwood haulage test in Sweden / C. Löfroth, Lena Larsson, J. Enström, G. Svenson, J. Aurell // Setting future standards: international symposium on heavy vehicle transport technology – HVT12: Stockholm, Sweden, 16-19 September 2012. – 18 p. – *Bibliogr.*: pp. 17. (14 titles).

9 Mark Brown Timber Truck 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. – *Bibliogr.*: pp. 137-138. (17 titles).

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

11 Grzegorz Trzciński Effects of Timber Loads on Gross Vehicle Weight / Grzegorz Trzciński, Waldemar Sieniawski, Tadeusz Moskalik // Folia Forestalia Polonica, series A, 2013, Vol. 55 (4), 159-167. – *Bibliogr.*: pp. 166-167. (23 titles). – DOI 10.2478/ffp-2013-0017.

12 Anttila P., Nummelin T., Väättäinen K., Juha Laitila J. (2020). The effect of winter weather on timber truck tare weights. *Silva Fennica* vol. 54 no. 4 article id 10385. 16 p. – *Bibliogr.*: pp. 14-16. (24 titles). – DOI 10.14214/sf.10385.

13 Marko Zorić Fuel consumption and greenhouse gas emission in timber haulage in croatian forestry / Marko Zorić, Marijan Šušnjar, Zdravko Pandur, Kristijan Mihaljević // Nova meh. šumar. 35(2014). – pp. 89-97. – *Bibliogr.*: pp. 96. (22 titles).

14 СП 318.1325800.2017. Дороги лесные, правила эксплуатации, Москва Стандартиформ, 2018. – 42 с.

15 Починков, С. В. Проблемы российского лесопользования / Починков С. В. – Вологда : б.и., 2015. – 359 с.

16 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.).

17 Келлер, С. Д. Конструкции, расчет и испытания автоприцепов / С. Д. Келлер. – М. ; Л. : Гизместпром, 1939. – 159 с.

18 Игитов, Ш. М. Повышение эффективности уборочно-транспортных звеньев применением автопоездов с демпфирующим тягово-цепным устройством : в условиях Республики Дагестан : диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.01 / Игитов Шамиль Магомедович; [Место защиты : Сарат. гос. аграр. ун-т им. Н. И. Вавилова]. – Махачкала, 2014. – 199 с. – *Библиогр.* : с. 143-158 (159 назв.).

19 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.

20 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.

21 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.

22 Патент на изобретение № 2713755 РФ, МПК В60D 1/14. Пружинно-гидравлическое тягово-цепное устройство автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, М. А. Малюкова ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова. – № 2019114304 ; заявл. 07.05.2019 ; опубл. 07.02.2020.

23 Патент на изобретение № 2729005 РФ, МПК В60D 1/14, В60D 1/145, В60D 1/155. Пневмо-гидравлическое тягово-сцепное устройство автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова. – № 2019144210 ; заявл. 24.12.2019 ; опубл. 03.08.2020.

24 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования движения лесовозного автопоезда с рекуперативным тягово-сцепным устройством / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев,; правообладатель Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова. – № 2019618402 ; заявл. 14.06.2019 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01.07.2019.

25 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования движения лесовозного автопоезда с рекуперативным пневмогидравлическим тягово-сцепным устройством / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев ; правообладатель Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова. – № 2020661429 ; заявл. 15.09.2020 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.09.2020.

26 Никонов, В. О. Анализ конструктивных особенностей тягово-сцепных устройств грузовых автомобилей с прицепами / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, Р. В. Журавлев // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 4, № 4 (26). – С. 13-24. Режим доступа : <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2018/4-4-26-2018/13-24.pdf> – Загл. с экрана. – Библиогр. : с. 22-24 (17 назв.).

27 Посметьев, В. И. Анализ эффективности традиционных и перспективных конструкций сцепных устройств прицепов с транспортными средствами / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, И. В. Сизьмин, А. В. Латынин // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – Т. 1, № 1 (31). – С. 58-86. Режим доступа : <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2020/1-31-2020/58-86.pdf> – Загл. с экрана. – Библиогр. : с. 82-86 (44 назв.).

28 Посметьев, В. И. Оценка актуальности применения в конструкциях лесовозных автопоездов рекуперативных сцепных устройств / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. В. Авдюхин, И. В. Сизьмин // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий», 2021. – С. 8-11. – Библиогр. : с. 33 (7 назв.). – DOI 10.34220/ITRT2021_30-33.

References

1 Trofimov V. I. *Avtomobilnie pricepi* [Car trailers]. State Scientific and Technical Publishing House of Engineering Literature, Moscow, 1953. – 180 p. (In Russ.).

2 Visockii M. S., Grishkevich A. I., Gileles L. H. i dr. *Podvijnoi sostav* [Rolling stock]. Textbook. allowance. Mn. : Vys. shk., 1989. – 240 p. (In Russ.).

3 Turevskii I. S. *Teoriya avtomobilya* [Car theory]. Moscow : Higher school, 2005. – 240 p. (In Russ.).

4 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.

5 Grzegorz Trzcinski, Tadeusz Moskalik, Rafał Wojtan Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo. *Forests* 2018, 9, 164 : doi : 10.3390/f9040164.

6 Šušnjar Marijan, Horvat Dubravko, Pandur Zdravko, Zorić, Marko Axle Load Determination of Truck with Trailer and Truck with Semitrailer for Wood Transportation. *Croatian journal of forest engineering* (1845-5719) 32 (2011), 1 379-388.

7 Zdravko Pandur, Hrvoje Nevečerel, Marijan Šušnjar, Marin Bačić, Krno Lepoglavec Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Hilly and Mountainous Forest Roads. *Forestist*, August 27, 2021 : doi : 10.5152/forestist.2021.21012.

8 C. Löfroth, Lena Larsson, J. Enström, G. Svenson, J. Aurell Ett – a modular system for

forest transport a three-year roundwood haulage test in Sweden. Setting future standards: international symposium on heavy vehicle transport technology – HVTT12: Stockholm, Sweden, 16-19 September 2012. – 18 p.

9 Mark Brown, Mohammad Reza Ghaffariyan Timber Truck Payload Management with Different In-Forest Weighing Strategies in Australia. *Croat. j. for. eng.* 37 (2016) 1. pp. 131-138.

10 R. Mousavi, R. Naghdi Time consumption and productivity analysis of timber trucking using two kinds of trucks in northern Iran. *J. FOR. SCI.*, 59, 2013 (5) : 211-221.

11 Grzegorz Trzciński, Waldemar Sieniawski, Tadeusz Moskalik Effects of Timber Loads on Gross Vehicle Weight. *Folia Forestalia Polonica, series A*, 2013, Vol. 55 (4), 159-167 : doi : 10.2478/ffp-2013-0017.

12 Anttila P., Nummelin T., Väätäinen K., Juha Laitila J. The effect of winter weather on timber truck tare weights. *Silva Fennica* vol. 54 no. 4 article id 10385. 16 p. : doi : 10.14214/sf.10385.

13 Marko Zorić, Marijan Šušnjar, Zdravko Pandur, Kristijan Mihaljević Fuel consumption and greenhouse gas emission in timber haulage in croatian forestry. *Nova meh. šumar.* 35(2014). – pp. 89-97.

14 SP 318.1325800.2017. Dorogi lesnie, pravila eksploatacii [SP 318.1325800.2017. Forest roads, operating rules]. Moscow Standartinform, 2018. – 42 p. (In Russ.).

15 Pochinkov S. V. *Problemi rossiiskogo lesopolzovaniya* [Problems of Russian forest management]. Vologda: b.i., 2015. – 359 p. (In Russ.).

16 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.).

17 Keller S. D. *Konstrukcii, raschet i ispitaniya avtopricepov* [Design, calculation and testing of trailers]. M. ; L. : Gizmestprom, 1939. – 159 p. (In Russ.).

18 Igitov Sh. M. *Povishenie effektivnosti uborochno_transportnih zvenev primeneniem avtopoezdov s dempfiruyuschim tyagovo-scepnim ustroystvom : v usloviyah Respubliki Dagestan* [Increasing the efficiency of harvesting and transport links by using road trains with a damper towing coupling: in the conditions of the Republic of Dagestan]. dissertation ... Candidate of technical sciences : 05.20.01 / Igitov Shamil Magomedovich ; [Place of protection: Sarat. state agrarian un-t them. NI Vavilov]. – Makhachkala, 2014. – 199 p. (In Russ.).

19 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.

20 Nikonov V. O., Posmetev V. I., Yakovlev K. A. *Rekuperaciya gidravlicheskoj energii v tyagovo_scepnom ustroystve 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.).

21 Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Sizmin I. V. Imitacionnaya model ocenki effektivnosti lesovoznogo avtopoezda, osnaschennogo rekuperativnim pnevmogidravlicheskim tyagovo-scepnim ustroystvom [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.).

22 Patent for invention №. 2713755 RF, IPC B60D 1/14. Spring-hydraulic traction-coupling device of a road train / V. I. Posmetyev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetiev, M. A. Malyukova ; applicant FGBOU VGLTU named after G. F. Morozov. – №. 2019114304 ; declared 05.07.2019 ; publ. 02.07.2020. (In Russ.).

23 Patent for invention №. 2729005 RF, IPC B60D 1/14, B60D 1/145, B60D 1/155. Pneumo-hydraulic traction-coupling device of a road train / V. I. Posmetyev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetiev; applicant FGBOU VGLTU named after G.F. Morozov. – №. 2019144210 ; declared

12.24.2019 ; publ. 08.03.2020. (In Russ.).

24 Certificate of state registration of a computer program. A program for modeling the movement of a timber road train with a recuperative traction coupling / V. I. Posmet'ev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetiev; copyright holder Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov. – №. 2019618402 ; declared 06.14.2019 ; registered in the Register of Computer Programs 07.01.2019. (In Russ.).

25 Certificate of state registration of a computer program. A program for modeling the movement of a timber road train with a recuperative pneumohydraulic towing device / V. I. Posmet'ev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetyev; copyright holder Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozova. – №. 2020661429 ; declared 09.15.2020 ; registered in the Register of computer programs on 09.23.2020. (In Russ.).

26 Nikonov V. O., Posmetev V. I., Juravlev R. V. *Analiz konstruktivnih osobennostei tyagovoscepnih ustroystv gruzovih avtomobilei s pricepami* [Analysis of the design features of the towing couplers of trucks with trailers]. Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2018. – Т. 4, №. 4 (26). – S. 13-24. Access mode: <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2018/4-4-26-2018/13-24.pdf>. (In Russ.).

27 Posmetev V. I., Nikonov V. O., Sizmin I. V., Latinin A. V. *Analiz effektivnosti tradicionnih i perspektivnih konstrukcii scepnih ustroystv pricepov s transportnimi sredstvami* [Analysis of the effectiveness of traditional and advanced designs of coupling devices for trailers with vehicles]. Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2020. – Т. 1, №. 1 (31). – S. 58-86. Access mode: <http://vestnikvglta.ru/arhiv/2020/1-31-2020/58-86.pdf> – Title. from the screen. (In Russ.).

28 Posmetev V. I., Nikonov V. O., Avdyuhin A. V., Sizmin I. V. *Ocenka aktualnosti primeniya v konstrukciyah lesovoznih avtopoezdov rekuperativnih scepnih ustroystv* [Assessment of the relevance of the use of recuperative coupling devices in the structures of timber road trains]. Materials of the All-Russian scientific and technical conference "Problems of road transport operation and ways to solve them on the basis of advanced technologies", 2021. – P. 8-11 : doi : 10.34220 / ITRT2021_30-33. (In Russ.).

© Посметьев В.И., Никонов В.О., Сизьмин И.В., 2021