

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6>

УДК 630*31 : 169.113



Имитационное моделирование работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания

Вадим О. Никонов¹✉, 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Валерий И. Посметьев¹, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Игорь В. Сизьмин¹, igorsizmin96@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Виктор В. Посметьев¹, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Владимир А. Зеликов¹, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Николай В. Мозговой², nv_moz@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9835-1824>

Петр В. Колодий³, pkolody@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6418-1531>

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

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Российская Федерация

³Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, ул. Мазурова, 59/34, г. Гомель, 246053, Республика Беларусь

Выявлены наиболее значимые факторы, от которых зависит изменение транспортных расходов, затрачиваемых лесозаготовительными предприятиями на процесс доставки лесоматериалов потребителям лесовозным автомобильным транспортом. Для сокращения таких расходов, предложена перспективная конструкция дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда, обеспечивающая эффект самовытаскивания автопоезда, генерирование и накопление энергии рабочей жидкости, с последующим ее использованием в технологическом гидравлическом оборудовании. Для имитационного моделирования движения лесовозного автопоезда, оснащенного предлагаемым дышлом сцепного устройства и работы дышла отдельно в режимах самовытаскивания, рекуперации и демпфирования динамических нагрузок разработаны две компьютерные программы. Установлено, что с увеличением глубины неровностей затрудняется самовытаскивание лесовозного автопоезда, что приводит к ухудшению показателей эффективности процесса самовытаскивания. Однако при средней глубине неровностей опорной поверхности менее 0,3 м показатели эффективности процесса самовытаскивания составляют приемлемые величины: скорость самовытаскивания более 0,22 м/с, величина перемещения за цикл удлинения-сокращения дышла сцепного устройства менее 0,12 м, потребляемая пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства мощность менее 1,9 кВт. При очень сложных дорожных условиях – средней глубине неровностей от 0,3 до 0,5 м – самовытаскивание лесовозного автопоезда происходит, но показатели эффективности снижаются: скорость самовытаскивания снижается до 0,16 м/с, перемещение увеличивается до 0,17 м, потребляемая мощность увеличивается до 3,1 кВт. Выявлено, что при изменении в широких пределах коэффициента вязкого трения колес лесовозного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью самовытаскивания от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью от 1,5 до 2,2 кВт.

Ключевые слова: лесовозный автопоезд, эффективность самовытаскивания, имитационное моделирование, глубина неровностей лесовозной дороги, транспортные издержки, потребляемая мощность, рекуперация энергии, коэффициент вязкого трения, дышло сцепного устройства

Финансирование: исследование проведено при поддержке локального гранта ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Имитационное моделирование работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, И. В. Сизьмин, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов, Н. В. Мозговой, П. В. Колодий // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 92–113. – Библиогр.: с. 110–112 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6>.

Поступила 21.09.2023. *Пересмотрена* 21.11.2023 *Принята* 21.11.2023. *Опубликована онлайн* 29.12.2023

Article

The simulation modeling of the operation of a recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function

Vadim O. Nikonov¹✉, 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Valerii I. Posmetev¹, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Igor V. Sizmin¹, igorsizmin96@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Viktor V. Posmetev¹, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Vladimir A. Zelikov¹, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Nikolay V. Mozgovoy², nv_moz@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9835-1824>

Petr V. Kolodii², pkolody@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6418-1531>

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

²Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh, 394006, Russian Federation

³F. Skorina Gomel State University, st. Mazurova – 59/34, Gomel, 246053, Republic of Belarus

Abstract

Based on the conducted exploratory research, the most significant factors were identified on which the change in transport costs spent by logging enterprises on the process of delivering timber to consumers by logging trucks depends. To reduce such costs, a promising design of the drawbar of the coupling device of a timber road train has been proposed, providing the effect of self-pulling of the road train, generating and storing the energy of the working fluid, with its subsequent use in technological hydraulic equipment. To simulate the movement of a timber road train equipped with the proposed drawbar of the coupling device and the operation of the drawbar separately in the modes of self-pulling, recovery and damping of dynamic loads, two computer programs have been developed. It has been established that with an increase in the depth of irregularities, self-pulling of a timber road train becomes more difficult, which leads to a deterioration in the efficiency of the self-pulling process. However, with an average depth of unevenness of the supporting surface of less than 0.3 m, the efficiency indicators of the self-retracting process are acceptable values: the self-retracting speed is more than 0.22 m/s, the amount of displacement per extension-reduction cycle of the drawbar of the coupling device is less

than 0.12 m, consumed by the pneumohydraulic drawbar of the coupling device power less than 1.9 kW. Under very difficult road conditions – the average depth of irregularities is from 0.3 to 0.5 m – the self-pulling of the timber road train occurs, but the efficiency indicators decrease: the self-pulling speed decreases to 0.16 m/s, the movement increases to 0.17 m, power consumption increases to 3.1 kW. It was revealed that when the coefficient of viscous friction of the wheels of a logging road train against the supporting surface of a logging road changes over a wide range, the recuperative pneumohydraulic drawbar of the coupling device provides a fairly effective self-pulling with a self-pulling speed from 0.17 to 2.3 m/s, a displacement (rollback) value from 0.09 to 0.16 m, power consumption from 1.5 to 2.2 kW.

Keywords: *logging road train, self-pulling efficiency, simulation modeling, depth of logging road roughness, transportation costs, power consumption, energy recovery, viscous friction coefficient, drawbar*

Funding: the research supported by a local grant from the FSBEI HE VSUFT.

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

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

For citation: Nikonov V. O., Posmetev V. I., Sizmin I. V., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Mozgovoi N. V., Kolodii P. V. (2023). The simulation modeling of the operation of a recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 92-113 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6>.

Received 21.09.2023 *Revised* 21.11.2023 *Accepted* 21.11.2023 *Published online* 29.12.2023

Введение

Природный потенциал и грамотное управление лесами в России дает возможность значительно увеличить объемы заготавливаемых и вывозимых лесоматериалов, а также обеспечить растущий спрос со стороны деревообрабатывающей промышленности. Процесс вывозки древесины автомобильным транспортом леса, являющийся важным, дорогостоящим и трудоемким звеном заготовки лесоматериалов, играет важную роль в доставке древесины из лесозаготовительных зон лесопильным, целлюлозным, деревообрабатывающим предприятиям, а также железнодорожным, складским и сортировочным терминалам. Транспортировка древесины, характеризующаяся большими лесными массивами и различной сосредоточенностью лесоперерабатывающих предприятий, составляет значительную долю от общих эксплуатационных расходов лесного хозяйства, и может изменяться от 25 до 45 %. На вывозку лесоматериалов к месту переработки затрачивается 20-30 % от общей стоимости заготавливаемой древесины. В местах с недостаточно развитой дорожной сетью стоимость вывозки лесоматериалов возрастает еще больше. Вы-

возка лесоматериалов после стадии погрузки составляет до 40 % от общих производственных затрат на лесопroduкцию. Лесоматериалы могут перевозиться по лесовозным дорогам различными лесовозными автомобилями с соответствующими техническими модификациями. Высокая эффективность вывозки лесоматериалов потребителям лесовозными автопоездами имеет решающее значение для обеспечения устойчивых выгод от заготовки древесины. Среди транспортных расходов, стоимость топлива составляет от 30 до 40 %. В этой связи, решение вопроса снижения транспортных издержек при вывозке лесоматериалов лесовозными автопоездами окажет существенное влияние на развитие лесного хозяйства [1].

На основании этого, поисковые исследования, направленные на выявление наиболее значимых факторов, от которых зависит изменение транспортных расходов, затрачиваемых лесозаготовительными предприятиями на процесс доставки лесоматериалов потребителям лесовозным автомобильным транспортом, являются актуальной задачей. Это подтверждается результатами опубликованных научных работ многих отечественных и зарубежных авторов. Среди

зарубежных авторов необходимо выделить работы следующих ученых [2-16].

В статье Matijosius J. и др. выполнены достоверные расчеты, позволяющие оценить изменение управляемости лесовозного автомобиля Volvo FH с лесоматериалами при: его резких торможениях, ускорениях в процессе преодоления поворотов на лесовозной дороге; изменении веса лесоматериалов; различных вариантах размещения лесоматериалов в кузове лесовозного автомобиля. Критериями, оказывающими влияние на управляемость и безопасность движения лесовозного автомобиля, были приняты такие параметры динамики лесовозного автомобиля, как скорость движения, крен, силы тяжести, трения, инерции, а также центробежная сила. Установлено, что силы инерции и тяжести оказывают наибольшее влияние при вывозке лесоматериалов на лесовозный автомобиль [2].

Hui Li и др. в своей работе рассмотрели вопрос автоматического изменения диаметра бревен, загруженных на лесовозный автопоезд с точки зрения важной части логистического процесса вывозки лесоматериалов. Установлено, что ручной метод определения диаметра бревен является неэффективным и способствует снижению производительности вывозки лесоматериалов. С целью ускорения и повышения точности автоматического определения диаметра бревен, загруженных на лесовозный автопоезд, предложен метод быстрой сегментации, основанный на технологии компьютерного зрения и работе нейронной сети, обеспечивающий извлечение цветного изображения, полученного со смартфона, с последующим встраиванием векторного изображения из входного снимка. При реализации данного метода было выявлено, что производительность процесса измерения значительно снижается при увеличении расстояния съемки и угла наклона камеры при съемке. Основными причинами этого являлись трудности обнаружения и обработки мелких и плотно упакованных изображений бревен. Ожидается, что практическое использование предложенного метода позволит повысить эффективность измерения бревен и значительно снизит стоимость вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами [3].

Tadeusz Moskalik и др. в своем исследовании рассмотрели вопрос необходимости повышения точности измерения объема лесоматериалов различных пород с целью обеспечения максимальной загрузки лесовозного автопоезда с учетом его допустимой полной массы и изменчивости влажности древесины. В данной работе выполнено сравнение фотооптического метода определения объема и веса, перевозимых лесовозным автопоездом лесоматериалов с методом лазерного сканирования. Установлено, что применение рассмотренных методов определения объема и веса лесоматериалов не учитывают изменчивость плотности древесины при различной влажности, погодных и сезонных условиях. Это приводит к тому, что лесовозные автопоезда в большинстве случаев оказываются перегруженными, что существенно ускоряет разрушение опорной поверхности лесовозных дорог, а также ухудшает безопасность их движения в процессе вывозки лесоматериалов [4].

Abdullah E. Akay и др. в своей статье рассмотрели вопрос эффективного планирования производственных затрат при вывозке лесоматериалов лесовозными автомобилями. Исследование метода сетевого анализа, позволяющего определить оптимальные маршруты вывозки лесоматериалов с минимальными затратами, позволило установить, что грузоподъемность лесовозных автомобилей оказывает существенное значение на изменение стоимости вывозки лесоматериалов. Кроме этого, включение дополнительных лесных складов в план транспортировки дает возможность значительно сократить себестоимость процесса вывозки лесоматериалов при одновременном увеличении общей прибыли от лесопроизводства [5].

В работе Tomas Zemanek и др. был рассмотрен вопрос проектирования и эксплуатационной оценки лесовозного тягача с прицепом, оснащенным гибридным приводом. Источником электроэнергии для двух асинхронных двигателей, приводящих в движение передние колеса тандемной оси прицепа, являлась аккумуляторная батарея, которая подзарядилась от асинхронной машины, работающей в качестве генератора в периоды пониженного потребления мощности дизельным двигателем тягача.

Электропривод был рассчитан на заданный цикл работы тягача с прицепом, а его нагрузочные характеристики испытаны в лаборатории. Максимальная пиковая мощность, потребляемая от аккумуляторной батареи, составила 33 кВт. В сложных дорожных условиях электропривод разгружает в работе двигатель внутреннего сгорания только тогда, когда загруженный лесоматериалами тягач с прицепом осуществляет движение на подъеме [6].

Pavel Scvor и др. исследовали в своей работе изменение работоспособности водителя лесовозного автопоезда от режима движения, параметров лесовозной дороги, а также загруженности автопоезда. Выявлено, что при вождении лесовозного автомобиля с прицепом, мышечная нагрузка водителя на лесовозных дорогах была на 39,4 % больше, чем на дорогах общего пользования. Повышение нагрузок на мышцы связано с движением автопоезда по узким и часто извилистым недостаточно обустроенным лесовозным дорогам, требующим более частых торможений и переключений на пониженную передачу с последующим ускорением и переключением на повышенную передачу. Установлено также, что водители более загруженных лесоматериалами лесовозных автопоездов, движущихся по лесовозным дорогам более низкого уровня обустроенности, испытывают большие стресс и утомление, что ведет к снижению работоспособности [7].

Karha K. и др. в своем исследовании выполнили сравнение расхода топлива при вывозке лесоматериалов двумя лесовозными автопоездами, массами 92 и 76 тонн с лесоперерабатывающих терминалов потребителям. Установлено, что средний вес полезной нагрузки у лесовозного автопоезда, массой 92 тонны был на 27 % выше, чем у лесовозного автопоезда, массой 76 тонн. Расход топлива у обоих исследуемых автопоездов при вывозке лесоматериалов был выше в зимний период времени, в сравнении с летним периодом. Лесовозный автопоезд, массой 92 тонны имел на 8-11 % меньший расход топлива, чем лесовозный автопоезд, массой 76 тонн при расстоянии вывозки лесоматериалов от 100 до 300 км. Рекомендовано с целью достижения большей экономии топлива и более высоких экологических показателей увеличить количество используемых для вывозки лесоматериалов лесовозных автопоездов, массой 92 тонны [8].

Sahar Andini в своей работе исследовал влияние различных факторов на эффективность функционирования лесовозных автопоездов. Установлено, что уровень обустроенности лесовозных дорог должен соответствовать техническим требованиям для выполнения должным образом своих важнейших функций. Кроме этого, выявлено, что общая производительность процесса вывозки лесоматериалов зависит от: времени вывозки, расстояния, скорости движения, объема вывозимой древесины, характеристик лесовозных дорог (подъемов, спусков, погодных условий, квалификации водителей, рельефа местности, возможностей выполнения технического обслуживания в полевых условиях). Вывозка лесоматериалов по временным лесовозным дорогам сопровождается их повреждением и возникновением на них колеи, которые могут препятствовать движению автопоезда, снижать скорость и безопасность движения, ускорять повреждение деталей и узлов лесовозного тягача, а также прицепа [9].

Grzegorz Tizcinski и др. в своей статье исследовали изменение нагрузок на осях лесовозных автопоездов в процессе вывозки лесоматериалов в различные сезоны года, в зависимости от типа компонования лесовозного автопоезда и вида вывозимой древесины. Установлено, что наименьшая осевая нагрузка приходится на передние оси всех исследуемых лесовозных автопоездов. В лесовозных автомобилях с прицепами, самые высокие средние нагрузки на ось приходятся на четвертую и пятую оси в диапазоне от 8,5 до 12 тонн. Распределение полной массы по лесовозному автопоезду составляет 58-60 % на трехосный лесовозный тягач и 40-42 % – на трехосный прицеп или полуприцеп [10].

Smidt M.F. и др. в своей работе выполнили исследование влияния квалификации водителей на безопасность и эффективность процесса транспортирования древесины лесовозным автомобильным транспортом. Водители лесовозного автомобильного транспорта составляют более 20 % всех работников лесозаготовительной отрасли. Вождение лесовозных автопоездов сопряжено с дополнительными трудностями при вождении по лесовозным дорогам низкой степени обустроенности, а также при погрузочно-разгрузочных работах. От уровня квалификации водителей и срока эксплуатации лесовоз-

ных автомобилей с прицепами зависит риск возникновения дорожно-транспортных происшествий. Установлено, что своевременное повышение квалификации водителей лесовозных автопоездов позволяет снизить риски возникновения аварий при вывозке лесоматериалов. Это достигается за счет улучшения осведомленности о ситуации на лесовозных дорогах, управления поведением в зависимости от утомляемости и усталости водителя, а также уменьшения ошибок и повышения навыков вождения [11].

Xuejing Du и др. исследовали в своей статье безопасность движения тягачей с прицепами в экстремальных дорожных условиях в холодных горных районах. В качестве показателей, определяющих безопасность движения на основе определения бокового скольжения и опрокидывания автопоезда, были выбраны следующие факторы: коэффициент сцепления, скорость движения, величина бокового ветра, поперечное ускорение, радиус поворота дороги, а также коэффициент отклонения от вертикальной нагрузки. Выявлено, что повышение величины бокового ветра способствует ухудшению бокового скольжения автопоезда. Установлено, что движение тягача с прицепом со скоростью в интервале от 0 до 30 км/ч является безопасным. Однако, при увеличении величины бокового ветра, безопасная скорость движения автопоезда снижается. Центр тяжести автопоезда существенно влияет на аэродинамические характеристики транспортного средства. При низком коэффициенте сцепления ледового и снежного покрытий дороги, предел бокового ускорения автопоезда ниже, чем у сухого покрытия дороги. Из-за низкого коэффициента сцепления с дорогой, при скорости выше 40 км/ч, колеса автопоезда начинают проскальзывать, ухудшая управление, а при резком торможении на такой скорости, происходит опрокидывание тягача с прицепом [12].

Jean-Francois Audy и др. в своей работе основное внимание уделили методам компьютерного оперативного планирования вывозки лесоматериалов для определения оптимального набора маршрутов применительно к парку лесовозных автопоездов, осуществляющих вывозку лесоматериалов из заданных мест заготовки потребителям. Такое оперативное планирование позволяет повысить эффективность использования лесовозных автопоездов за

счет минимизации общего расстояния в пути, расстояния в пути порожнего автопоезда, времени непродуктивной деятельности, вредных выбросов в окружающую среду, а также за счет снижения транспортных расходов. Установлено, что задачи маршрутизации лесовозных автотранспортных средств при вывозке лесоматериалов отличаются от задач маршрутизации транспортных средств общего пользования. При решении таких задач необходимо учитывать: имеющийся подвижной парк лесовозных автопоездов различного компонования; полную или частичную загрузку автопоездов; расстояние вывозки; погодные условия и состояние лесовозных дорог; изменение наличия лесоматериалов на лесозаготовительных участках; количество заездов на один и тот же объект; необходимость транспортирования различных сортов древесины между многими лесозаготовительными предприятиями и потребителями. Кроме этого, необходимо обеспечить управление операциями погрузки, разгрузки и вывозки лесоматериалов в режиме реального времени для исключения простоев автопоездов и синхронизировать работу лесовозных автопоездов без средств самопогрузки с автономными погрузчиками [13].

Perttu Anttila и др. в своей статье выполнили оценку изменения расхода топлива 13 типовыми лесовозными автопоездами в зависимости от времени года, расстояния вывозки, массы, характеристик транспортных средств и лесовозных дорог, а также от погодных условий. Установлено, что наибольший расход топлива у исследуемых автопоездов зафиксирован в зимний период, а наименьший – в летний период. Увеличение максимальной мощности двигателя автопоезда, а также количества и размеров шин оказывают влияние на рост расхода топлива. Частые повороты, подъемы, кривизна, неровности и дефекты, имеющиеся на лесовозной дороге также увеличивают расход топлива. Средний расход топлива уменьшается с увеличением расстояния вывозки, поскольку уменьшается доля лесовозных дорог, увеличивается доля дорог высокого уровня качества, обеспечивающая движение автопоезда с более стабильной скоростью, кроме этого, погрузочно-разгрузочные операции выполняются реже при вывозке лесоматериалов на дальние расстояния, чем на короткие. Расход топлива автопоездом зависит от состояния лесовозных дорог, на которое может вли-

ять погодные условия (осадки, изменение температуры, влажности). Также, на расход топлива оказывает влияние стаж водителя автопоезда, стиль вождения, внимательность, соблюдение скоростного режима движения и количество резких троганий и торможений [14].

Heikki Liimatainen и др. исследовали влияние использования 76 и 90 тонных большегрузных лесовозных автопоездов с шарнирно-сочлененной рамой, задействованных в процессе вывозки лесоматериалов на изменение объемов вывозимых лесоматериалов, транспортных расходов и вредных выбросов в окружающую среду. Установлено, что с увеличением длины и веса лесовозного автопоезда более эффективно используются ресурсы, т.е. практическое применение более крупных транспортных средств повышает эффективность процесса вывозки лесоматериалов. Переход с 60 тонных лесовозных автопоездов на 90 тонные может сократить пробег лесовозных автопоездов на 20 %, расход топлива на 6 %, вредные выбросы на 3,6 %, что существенно отразится на снижении транспортных расходов [15].

Sasanka Katreddi и др. исследовали влияние различных факторов на изменение топливной экономичности большегрузных автопоездов. Топливная эффективность большегрузных автопоездов может быть выгодна не только для автомобильной промышленности, но и для экономики страны в целом. Стоимость потребляемого топлива составляет примерно 30 % стоимости жизненного цикла большегрузного автопоезда. Сокращение расхода топлива всего на несколько процентов позволит значительно снизить затраты транспортной отрасли. Прогнозирование расхода топлива за поездку на основе динамических дорожных данных (параметров дороги, поведения водителя, погодных условий, характеристик транспортного средства) дает возможность автомобильной промышленности снизить затраты и время на дорожные испытания. Использование нейронной искусственной сети для прогнозирования изменения расхода топлива в современных большегрузных автопоездах, учитывающей нагрузку и частоту вращения коленчатого вала двигателя, а также скорость автопоезда, позволяет оптимизировать работу автопарка на различных маршрутах движения [16].

Выполненное поисковое исследование, позволило установить, что наиболее значимыми факторами, влияющими на изменение транспортных издержек, затрачиваемых на вывозку лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом, являются: квалификация, дисциплинированность и стаж водителей, стиль вождения, внимательность, соблюдение скоростного режима движения; разнообразие подвижного парка лесовозного автомобильного транспорта, их конструктивные особенности; компонование лесовозного автопоезда; оснащение прицепа автопоезда гибридным приводом; управляемость и безопасность движения, собственная масса и длина лесовозного автопоезда; срок эксплуатации лесовозного автопоезда, его максимальная полезная загруженность; способ загрузки и разгрузки лесоматериалов; рациональная схема размещения лесоматериалов в кузове автомобиля и прицепного звена; надежность крепления лесоматериалов; точность определения диаметра бревен, загружаемых на лесовозный автопоезд; изменчивость веса и плотности лесоматериалов при различной влажности, погодных и сезонных условиях; скорость движения и расстояние транспортировки лесоматериалов; наличие возможности осуществления технического обслуживания и ремонта автопоезда в полевых условиях; степень обустроенности лесовозных дорог (наличие дефектов, неровностей и препятствий); параметры лесовозных дорог (уклоны, подъемы, длина, тип, кривизна, повороты); количество резких торможений, троганий и ускорений при движении по лесовозной дороге низкой степени обустроенности; режимы погоды, характерные для данной местности; оперативно-календарное планирование, а также оптимальность маршрута движения при транспортировании лесоматериалов потребителям.

Одним из направлений, способствующих существенному сокращению транспортных расходов, затрачиваемых на вывозку древесины потребителям лесовозными автопоездами, является разработка для лесовозных автомобилей с прицепами и исследование новых конструкций тягово-сцепных устройств. Их применение позволит повысить надежность автопоезда за счет демпфирования динамических нагрузок между его звеньями, а также снизить расход топлива, за счет преобразования, накопления в

пневмогидроаккумуляторе и дальнейшего использования в технологическом гидравлическом оборудовании энергии рабочей жидкости. Результаты исследований, проведенные ранее авторами, позволили предложить перспективную конструкцию дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда с функцией самовытаскивания (рис. 1). Помимо рекуперации энергии рабочей жидкости, такое дышло сцепного устройства обеспечивает лесовозному автомобилю с прицепом эффект самовытаскивания, что улучшает его проходимость при преодолении различных препятствий и неровностей, имеющих в большом количестве на временной лесовозной дороге [18].

Цель работы достигается за счет использования метода имитационного моделирования, позволяющего исследовать функционирование рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного

устройства в режиме самовытаскивания лесовозного автопоезда.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объектом исследования в данной работе является процесс функционирования сцепного устройства новой конструкции, установленного в лесовозном автопоезде при движении автопоезда по лесовозным дорогам с различной степенью обустроенности.

В качестве предмета исследования выступают закономерности влияния средней глубины h_{holl} , неровностей, имеющих на лесовозной дороге и коэффициента вязкого трения k_{visc} , колес лесовозного автопоезда на среднюю скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$, величину перемещения (отката) назад лесовозного автопоезда x_{rollb} и потребляемую предлагаемым дышлом сцепного устройства мощность N_{cons} .

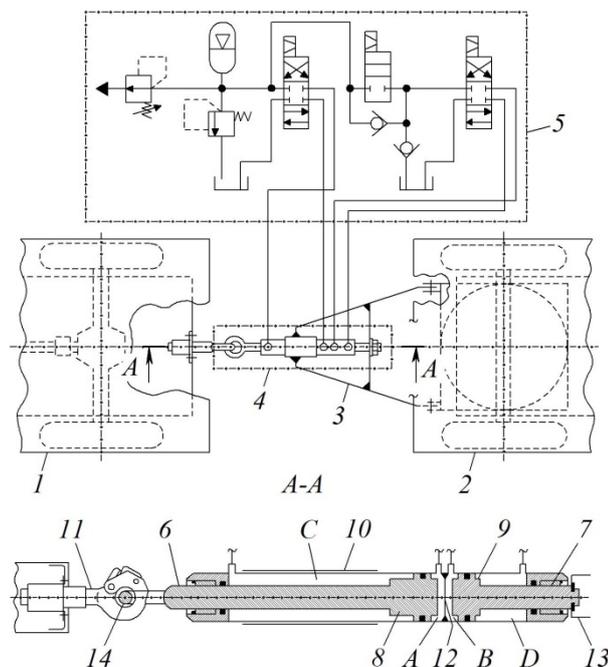


Рисунок 1. Конструкция дышла сцепного устройства автопоезда: 1 – лесовозный тягач; 2 – прицепное звено; 3 – дышло сцепного устройства; 4 – последовательно соединенные торцами два гидроцилиндра двухстороннего действия; 5 – гидропривод; A, B и C, D – поршневые и штоковые полости гидроцилиндров двухстороннего действия; 6, 7 и 8, 9 – штоки и поршни гидроцилиндров двухстороннего действия; 10 – корпус дышла; 11 – крюк; 12 – герметичная перегородка; 13 – поперечина дышла; 14 – присоединительное кольцо

Figure 1. Design of the drawbar of the coupling device of a road train: 1 – timber tractor; 2 – trailed link; 3 – drawbar of the hitch; 4 – two double-acting hydraulic cylinders connected in series by the ends; 5 – hydraulic drive; A, B and C, D – piston and rod cavities of double-acting hydraulic cylinders; 6, 7 and 8, 9 – rods and pistons of double-acting hydraulic cylinders; 10 – drawbar body; 11 – hook; 12 – sealed partition; 13 – drawbar crossbar; 14 – connecting ring

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Дизайн эксперимента или сбор данных

В современном машиностроении для оценки работоспособности новых технических решений, а также оптимизации их конструктивных параметров широко используется метод математического и компьютерного моделирования. На основании этого, в данной работе поставлена задача, разработать для предложенной авторами конструкции рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда математическую модель и реализующие ее компьютерные программы. Такая математическая модель должна позволить оценить эффективность работы рекуперативного дышла сцепного устройства в режиме работы при самовытаскивании автопоезда, а также

эффективность автопоезда при движении по лесовозной дороге различной степени обустроенности.

Исследуемый автопоезд состоит из лесовозного трехосного тягача и трехосного прицепа, которые представлены в математической модели двумя абсолютно твердыми телами. Два этих тела движутся в пространстве и взаимодействуют друг с другом по закону динамики через рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства AB (рис. 2). Кроме этого, в рамках упруго-вязкого приближения, лесовозный автопоезд взаимодействует с моделируемой опорной поверхностью через подвеску и колеса. Для трехосного лесовозного автомобиля и трехосного прицепа рассматриваются по шесть точек касания с опорной поверхностью лесовозной дороги.

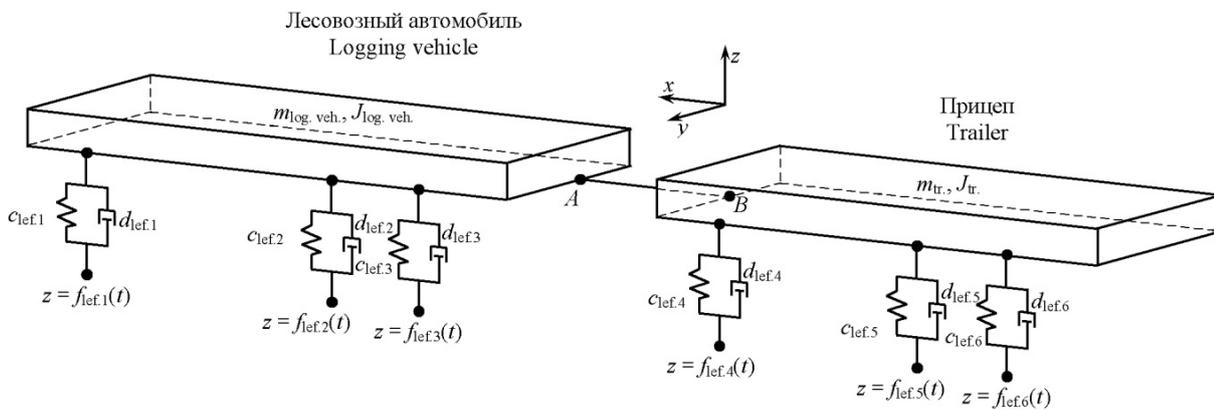


Рисунок 2. Расчетная схема автопоезда, оснащенного рекуперативным дышлом сцепного устройства, обеспечивающим эффект самовытаскивания

Figure 2. Calculation scheme of a road train equipped with a regenerative drawbar of the coupling device, providing the effect of self-pulling

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own schema

Массы ходовой части лесовозного автомобиля и прицепа составляли фиксированные величины $m_{\text{timb. tract.}}$ и $m_{\text{trail.}}$. Однако их моменты инерции $J_{\text{trail.}}$ и $J_{\text{timb. tract.}}$ необходимо было регулярно пересчитывать для текущего момента времени относительно мгновенных осей вращения ходовой части. В процессе моделирования постоянно пересчитывались координаты центров тяжести лесовозного автомобиля ($x_{\text{timb. tract.}}$, $y_{\text{timb. tract.}}$, $z_{\text{timb. tract.}}$) и прицепа ($x_{\text{trail.}}$, $y_{\text{trail.}}$, $z_{\text{trail.}}$), а также углы ориентации ($\varphi_{x \text{ timb. tract.}}$, $\varphi_{y \text{ timb. tract.}}$, $\varphi_{z \text{ timb. tract.}}$), ($\varphi_{x \text{ trail.}}$, $\varphi_{y \text{ trail.}}$, $\varphi_{z \text{ trail.}}$) хо-

довой части указанных тел относительно неподвижной системы координат. Движение автопоезда с новым дышлом сцепного устройства описывалось в математической модели системой дифференциальных уравнений второго порядка, аналогично представленным в работах [1, 17]. Отличием этих дифференциальных уравнений, составленных на основе закона Ньютона и основного уравнения динамики вращательного движения, является представление в модели лесовозного автопоезда в составе трехосного лесовозного автомобиля и трехосного прицепа.

$$\left\{ \begin{aligned} m_{timb.tract.} \frac{d^2 x_{timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (F_{lef.i}^x + F_{righ.i}^x) + F_A^x; \\ m_{timb.tract.} \frac{d^2 y_{timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (F_{lef.i}^y + F_{righ.i}^y) + F_A^y; \\ m_{timb.tract.} \frac{d^2 z_{timb.tract.}}{dt^2} &= -m_{timb.tract.} g + \sum_{i=1}^3 (F_{lef.i}^z + F_{righ.i}^z) + F_A^z; \\ J_{timb.tract.x} \frac{d^2 \varphi_{x\ timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (M^x(F_{lef.i}) + M^x(F_{righ.i}) + M^x(F_A)); \\ J_{timb.tract.y} \frac{d^2 \varphi_{y\ timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (M^y(F_{lef.i}) + M^y(F_{righ.i}) + M^y(F_A)); \\ J_{timb.tract.z} \frac{d^2 \varphi_{z\ timb.tract.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^3 (M^z(F_{lef.i}) + M^z(F_{righ.i}) + M^z(F_A)); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} m_{trail.} \frac{d^2 x_{trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (F_{lef.i}^x + F_{righ.i}^x) + F_B^x; \\ m_{trail.} \frac{d^2 y_{trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (F_{lef.i}^y + F_{righ.i}^y) + F_B^y; \\ m_{trail.} \frac{d^2 z_{trail.}}{dt^2} &= -m_{trail.} g + \sum_{i=4}^6 (F_{lef.i}^z + F_{righ.i}^z) + F_B^z; \\ J_{trail.x} \frac{d^2 \varphi_{x\ trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (M^x(F_{lef.i}) + M^x(F_{righ.i}) + M^x(F_B)); \\ J_{trail.y} \frac{d^2 \varphi_{y\ trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (M^y(F_{lef.i}) + M^y(F_{righ.i}) + M^y(F_B)); \\ J_{trail.z} \frac{d^2 \varphi_{z\ trail.}}{dt^2} &= \sum_{i=4}^6 (M^z(F_{lef.i}) + M^z(F_{righ.i}) + M^z(F_B)); \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $F_{lef.i}$ и $F_{righ.i}$ – силы, которые передаются от колес через подвеску лесовозного автопоезда i -й оси, соответственно по левому и правому бортам; $F_A^x, F_A^y, F_A^z, F_{Bx}, F_{By}, F_{Bz}$ – составляющие сил, действующие со стороны рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства на лесовозный автомобиль и прицеп; t – время; M^i – моменты сил $F_{lef.i}, F_{righ.i}, F_A^x, F_A^y, F_A^z, F_{Bx}, F_{By}, F_{Bz}$ относительно оси i .

Для упрощения модели взаимодействие между лесовозным автомобилем и прицепом с опорной поверхностью лесовозной дороги считали упруго-вязким. Для каждой точки касания опорной поверхности лесовозной дороги с лесовозным автомобилем или прицепом использовали следующее уравнение для расчета вертикальной силы, действующей на корпус лесовозного автопоезда [1]:

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

где i – номер исследуемого колеса лесовозного автопоезда; $R_{wh.}$ – радиус колеса; $z_{surf.i}(x, y)$ – вертикальная координата опорной поверхности лесовозной дороги под колесом автопоезда; $z_{surf.i}$ – вертикальная координата точки присоединения колеса к лесовозному автопоезду; c_i, d_i – коэффициенты, характеризующие жесткость, а

также демпфирование при упруго-вязком взаимодействии.

Для обеспечения адекватности математической модели реальному процессу в ней также осуществляется учет, как поперечных составляющих сил, так и горизонтальных продольных сил сцепле-

ния колес лесовозного автопоезда с опорной поверхностью лесовозной дороги. Решение этих дифференциальных уравнений в разработанной математической модели осуществляется на основе метода Рунге-Кутты второго порядка. Формула, по которой осуществлялся расчет соответствующих параметров (сил и моментов, действующих на автопоезд) на основании координат x_τ и скоростей движения $v_{x\tau}$ моделируемого объекта для последующего шага интегрирования $\tau + 1$ при дискретизации времени на равные промежутки Δt имеет следующий вид [1]:

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

Таким же образом осуществлялся расчет декартовых составляющих y и z , а также угловых координат для лесовозного автопоезда.

Одним из способов представления возможных неровностей, а также дефектов, имеющих на недостаточно обустроенной лесовозной дороге, является описание функции рельефа как комбинации множества неровностей гауссовой формы. Такое описание позволяет выполнять моделирование различных по уровню обустроенности лесовозных дорог (рис. 3).

Формула, описывающая функцию изменения высоты опорной поверхности лесовозной дороги от координат точки контакта колеса $z(x, y)$ лесовозного автопоезда, имеет следующий вид [1]:

$$z(x, y) = H_0 - \sum_{i=1}^{N_B} H_i \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (5)$$

где H_0 – базовый уровень поверхности лесовозной дороги, относительно которого формируются неровности (в дальнейших расчетах $H_0 = 0$); N_B – количество гауссовых неровностей.

В математической модели рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства представлено последовательно соединенными свободными торцами двумя гидроцилиндрами двухстороннего действия. Первый гидроцилиндр (входы 1, 2 на рис. 4) выполняет функцию демпфирования продольных колебаний звеньев лесовозного

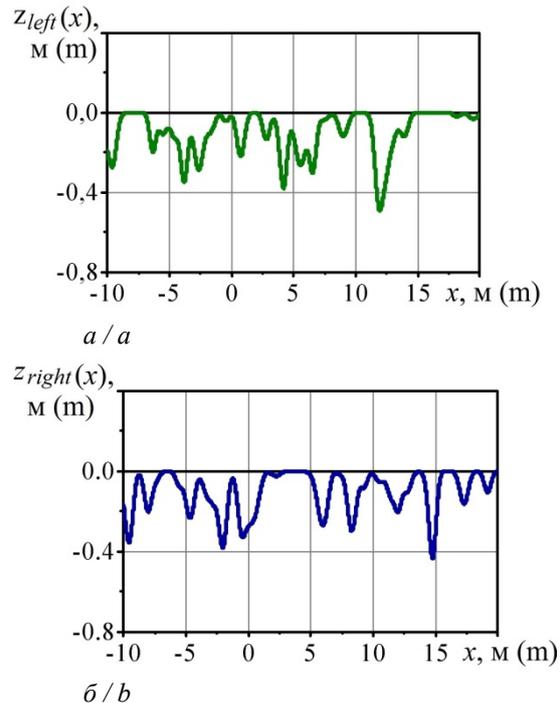


Рисунок 3. Зависимости высоты опорной поверхности $z(x)$ от продольной координаты x : a – функция рельефа поверхности для колес левого борта; b – функция рельефа поверхности для колес правого борта

Figure 3. Dependences of the height of the support surface $z(x)$ on the longitudinal coordinate x : a – function of the surface topography for the left side wheels; b – surface topography function for starboard wheels

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

автопоезда, второй гидроцилиндр (входы 3, 4 на рис. 4) – функцию рекуперации энергии, совместная же работа двух гидроцилиндров обеспечивает эффект самовытаскивания лесовозного тягача с прицепом. Поршни гидроцилиндров перемещаются в математической модели под действием продольной силы между лесовозным автомобилем и прицепом, а также сил, действующих со стороны рабочей жидкости, имеющейся в поршневых 2, 3 и штоковых 1, 4 полостях.

Гидравлический подсистема дышла сцепного устройства представлена в математической модели в виде двух поршневых и двух штоковых полостей, содержащих рабочую жидкость, а также

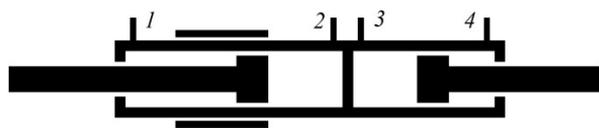


Рисунок 4. Представление в компьютерной программе дышла сцепного устройства, обеспечивающего рекуперацию энергии и функцию самовытаскивания лесовозного автопоезда

Figure 4. Representation in the computer program of the drawbar of the coupling device, which provides energy recovery and the function of self-pulling of a timber road train

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

одной жидкостной полости - пневмогидроаккумулятора. В зависимости от режима движения лесовозного автопоезда (торможение, ускорение) все рассматриваемые полости взаимодействуют друг с другом, а также с присоединительным портом, через гибкие, напорные, сливной, всасывающий и всасывающе-сливные трубопроводы. Зависимости, позволяющие определить расход Q_{ij} гидравлической рабочей жидкости, скорость v_{pneum} , перемещения поршня и изменение давления в жидкостной P_{liq} и газовой P_{gas} полостях пневмогидроак-

$$x_{roll} = \frac{1}{2 \cdot N_{leng.-shot}} \sum_{i=1}^{N_{leng.-shot}} \left((x_{timb.tract.}(t_{i3}) - x_{timb.tract.}(t_{i4})) + (x_{trail.}(t_{i1}) - x_{trail.}(t_{i2})) \right), \quad (7)$$

где $N_{leng.-short}$ – количество циклов удлинения-сокращения дышла сцепного устройства ($N_{leng.-short}$ должно быть не менее пяти в компьютерном эксперименте); i – номер цикла удлинения-сокращения дышла сцепного устройства; $x_{timb.tract.}$ и $x_{trail.}$ – продольные декартовы координаты лесовозного автомобиля и прицепа; t_{i1} , t_{i2} , t_{i3} , t_{i4} – моменты времени в

$$N_{cons.} = \frac{\pi D_{hydr.cyl.}^2}{4 \left[t_{comp.ex.} / \Delta t \right]} \sum_{\tau=1}^{\lceil t_{comp.ex.} / \Delta t \rceil} \left(\frac{L^\tau - L^{\tau-1}}{\Delta t} \left| P_1^\tau - P_2^\tau + P_3^\tau - P_4^\tau \right| \right), \quad (8)$$

где $D_{hydr.cyl.}$ – внутренний рабочий диаметр гидроцилиндра, состоящего из последовательно соединенных свободными торцами двух гидроцилин-

кумулятора, описаны в более ранних работах авторов [1, 17]. Отличием от ранее разработанной математической модели, является то, что для оценки эффективности процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда рекуперативным пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства, используются три новые введенные показателя.

Средняя скорость самовытаскивания $v_{self.-pull}$ рассчитывается по формуле:

$$v_{self.-pull} = \frac{x_{cent.of grav.}(t_2) - x_{cent.of grav.}(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (6)$$

где $x_{cent.of grav.}(t)$ – продольная декартова координата центра тяжести лесовозного автомобиля; t_1 и t_2 – моменты времени, в которые начинается и заканчивается процесс самовытаскивания лесовозного автопоезда. Для достаточно качественного усреднения результатов процесс самовытаскивания должен заключаться не менее чем в пяти циклах удлинения-сокращения рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства.

Средняя величина значения перемещения (отката) $x_{от}$ назад лесовозного автопоезда за однократное удлинение-сокращение рекуперативного дышла определяется по формуле:

цикле i , в которые соответственно начинается удлинение дышла, завершается удлинение дышла, начинается сокращение дышла, завершается сокращение дышла.

Средняя потребляемая рекуперативным дышлом сцепного устройства мощность $N_{cons.}$ рассчитывается по формуле:

дров двухстороннего действия; $t_{comp.ex.}$ – длительность компьютерного эксперимента; Δt и τ – шаг и номер его интегрирования дифференциальных уравнений по времени; $[\dots]$ – оператор округления до

целого числа; L^r – длина рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства; P_k^r – давление рабочей жидкости в полости k гидроцилиндра.

Для имитационного моделирования движения лесовозного автопоезда оснащенного предлагаемым дышлом сцепного устройства и работы дышла отдельно в режимах самовытаскивания, рекуперации и демпфирования динамических нагрузок разработаны две компьютерные программы. Первая – «Программа для моделирования работы дышла сцепного устройства автопоезда в режиме рекуперации энергии». Вторая – «Программа для моделирования процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда дышлом сцепного устройства. Интерфейсные формы вывода результатов экспериментов, полученные в этих компьютерных программах, приведены на рисунках 5, 6 [19, 20].

При теоретическом исследовании эффективности разработанного рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства в процессе самовытаскивания необходимо установить, как влияют геометрические и кинематические параметры рекуперативного дышла сцепного устройства и параметры опорной поверхности лесовозной дороги на показатели интенсивности и затрат мощности процесса самовытаскивания (рис. 7).

К параметрам рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда относятся: D_{hydr} – внутренний рабочий диаметр гидроцилиндра; ΔL – величина хода рекуперативного дышла сцепного устройства; v_{draw} – скорость удлинения (или сокращения) рекуперативного дышла сцепного устройства; $\Delta t_{el.cont}$ – интервал времени между последовательными процессами удлинения и сокращения. Основными параметрами различной степени обустроенности лесовозной дороги, являются: h_{hol} – средняя глубина случайных неровностей; k_{vis} – коэффициент вязкого трения колес об опорную поверхность. Эффективность процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда дышлом сцепного устройства оценивается следующими показателями: $v_{self-pull}$ – средняя скорость са-

мовытаскивания; x_{roll} – средняя величина перемещения (отката) назад лесовозного автопоезда за однократное удлинение-сокращение рекуперативного дышла сцепного устройства; N_{cons} – средняя мощность, потребляемая при работе дышла автопоезда.

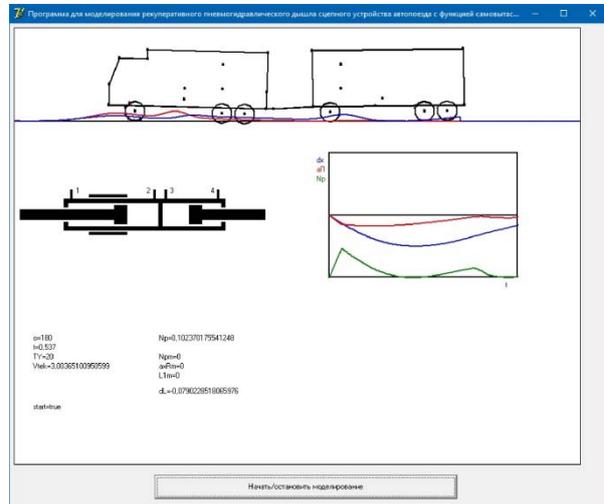


Рисунок 5. Интерфейсная форма с результатами моделирования

Figure 5. Interface form with simulation results

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

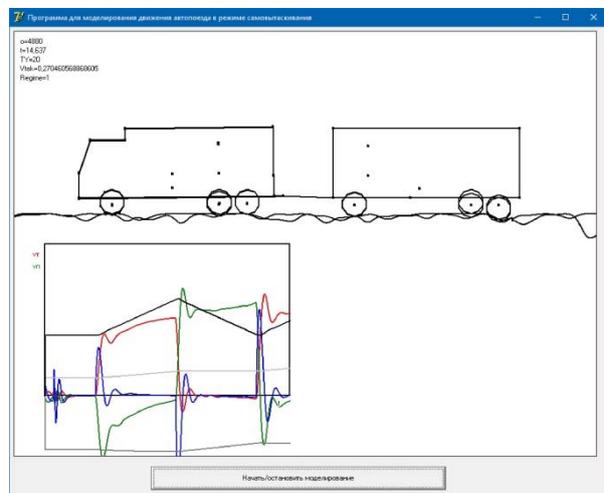


Рисунок 6. Интерфейсная форма с результатами моделирования

Figure 6. Interface form with simulation results

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

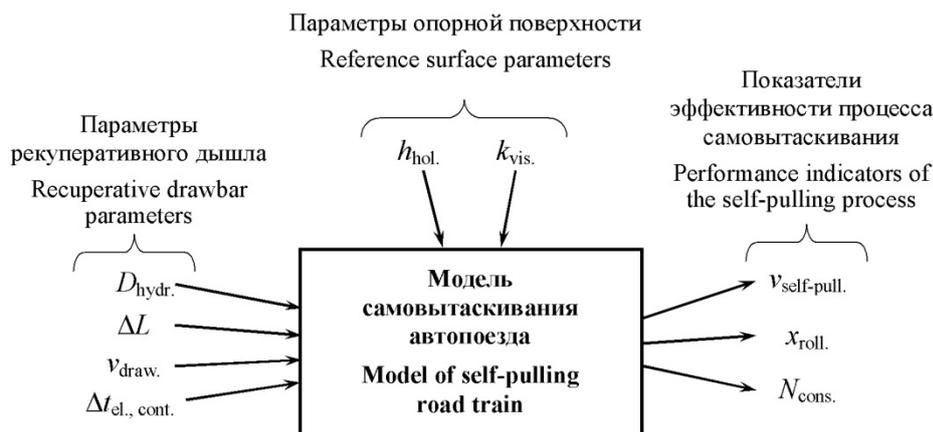


Рисунок 7. Задаваемые в модели входные характеристики и исследуемые выходные параметры

Figure 7. Input characteristics specified in the model and output parameters studied

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

Результаты и обсуждения

В процессе исследования, выполняемого в компьютерных программах, требовалось установить зависимость влияния конструктивных параметров дышла автопоезда, геометрических параметров опорной поверхности лесовозной дороги на показатели эффективности процесса самовытаскивания лесовозного автомобиля с прицепом.

Теоретическое исследование осуществлялось путем проведения необходимого количества экспериментов в разработанных компьютерных программах с различными наборами параметров рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства, а также неровностей, имеющих на лесовозной дороге с различной степенью обустроенности. Каждый компьютерный эксперимент начинался с приведением лесовозного автопоезда в равновесное состояние с опорной поверхностью моделируемой лесовозной дороги. В начальный момент времени лесовозный автопоезд условно располагался на высоте около 1 м над опорной поверхностью лесовозной дороги (рис. 8, а). С началом численного интегрирования уравнений движения лесовозный автопоезд под действием сил тяжести двигался вниз и в определенный момент времени касался опорной поверхности лесовозной дороги (рис. 8, б). Упруго-вязкое взаимодействие лесовозного автопоезда с опорной поверхностью лесовозной дороги приводило к тому, что после нескольких затухающих колебаний (рис. 8, в) лесовозный автопоезд неподвижно останав-

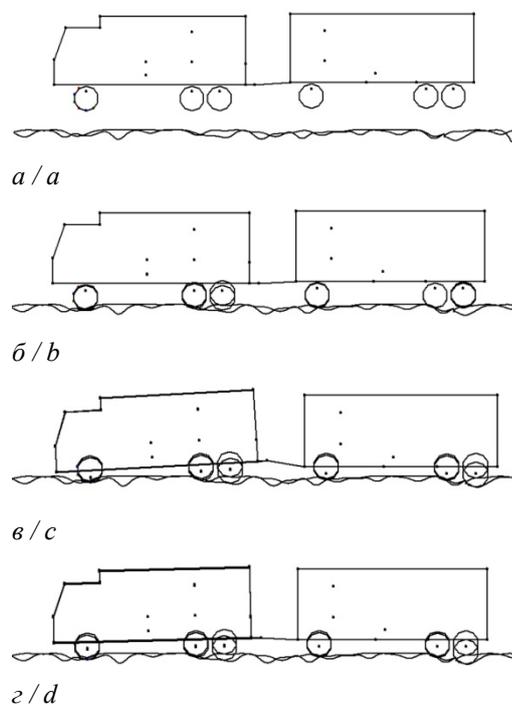


Рисунок 8. Приведение автопоезда в состояние равновесия: а – $t = 0$ с; б – $t = 0,48$ с; в – $t = 0,72$ с; г – $t = 1,62$ с

Figure 8. Bringing the road train into equilibrium: а – $t = 0$ s; б – $t = 0.48$ s; в – $t = 0.72$ s; г – $t = 1.62$ s

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own schema

ливался на опорной поверхности – приходил в состояние равновесия с момента начала компьютерного эксперимента к моменту времени около 1,62 с (рис. 8, з).

После этого в модели воспроизводилось циклическое удлинение и сокращение рекуперативного дышла сцепного устройства с поочередным торможением колес прицепа и лесовозного автомобиля соответственно (рис. 9). Первое удлинение рекуперативного дышла сцепного устройства на 1,2 м с одновременным торможением колес прицепа приводило к тому, что лесовозный автомобиль смещался

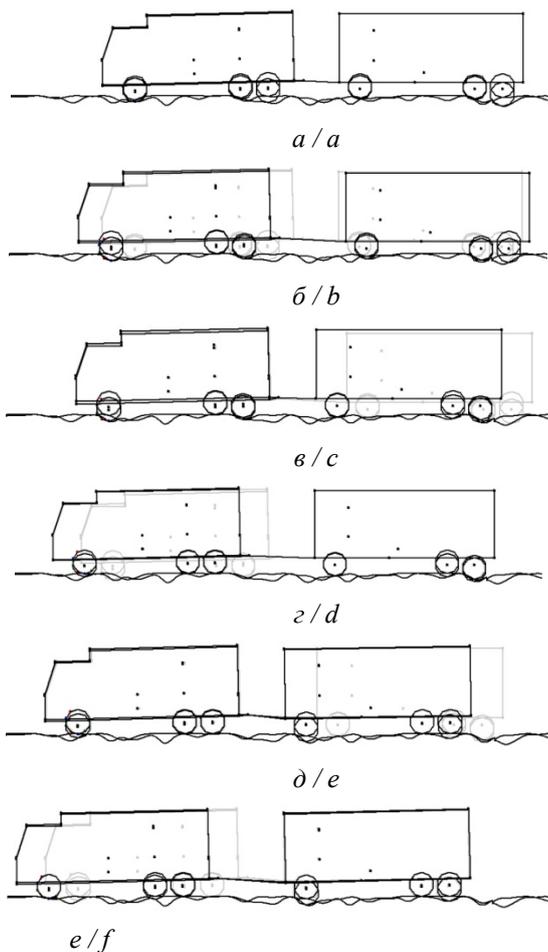


Рисунок 9. Последовательные удлинения и сокращения рекуперативного дышла при реализации режима самовытаскивания: $a - t = 3$ с; $б - t = 7,74$ с; $в - t = 12,54$ с; $г - t = 17,4$ с; $д - t = 22,2$ с; $е - t = 27$ с

Figure 9. Successive lengthening and contraction of the regenerative drawbar when implementing the self-pulling mode: $a - t = 3$ s; $b - t = 7.74$ s; $c - t = 12.54$ s; $d - t = 17.4$ s; $e - t = 22.2$ s; $f - t = 27$ s

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own scheme

вперед примерно на 0,9 м, а прицеп смещался назад (откат) примерно на 0,3 м – из-за вязкого трения заблокированных колес об опорную поверхность лесовозной дороги (рис. 9, а). Удлинение и сокращение рекуперативного дышла сцепного устройства производилось по линейному закону с одной и той же скоростью удлинения и сокращения (рис. 10, а). Как видно из зависимости продольной координаты x_{trail} прицепа от времени, в процессе удлинения

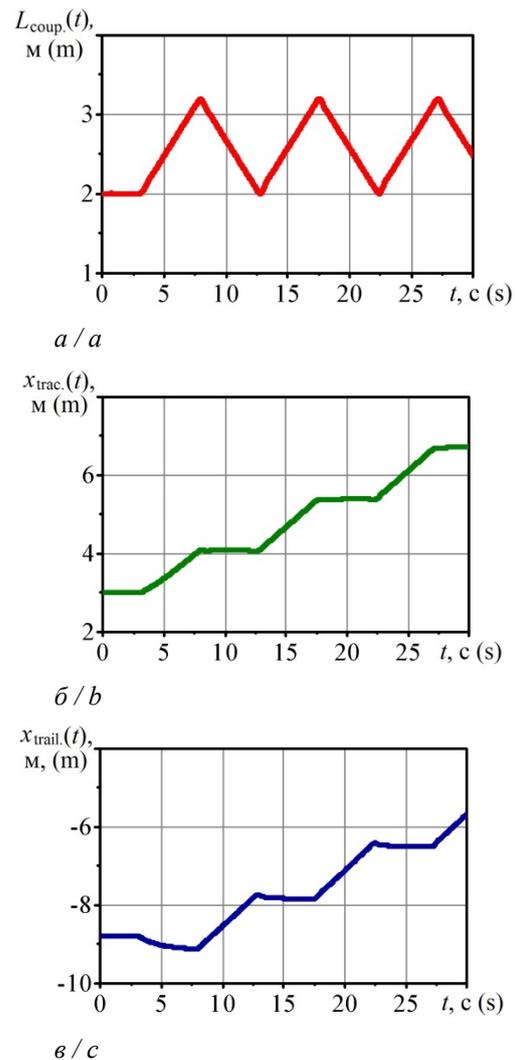


Рисунок 10. Зависимости от времени t длины L_{coup} рекуперативного дышла сцепного устройства (а), продольной координаты центров тяжести тягача x_{trac} (б) и прицепа x_{trail} (в)

Figure 10. Dependences on time t of the length L_{coup} regenerative hitch drawbar (a), longitudinal coordinates of the centers of gravity of the tractor x_{trac} (b) and trailer x_{trail} (c)

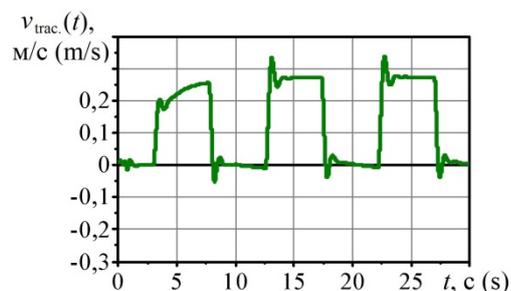
Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

дышла, прицеп движется назад на незначительную величину (участки убывания) (рис. 10, б).

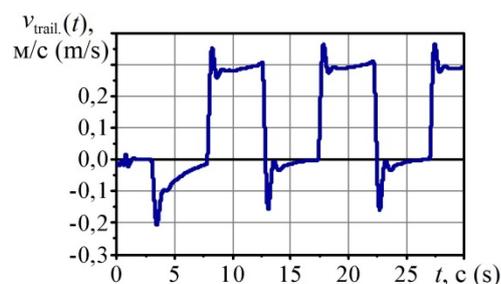
После первого удлинения дышла сцепного устройства в модели воспроизводилось сокращение длины дышла с одновременным блокированием колес лесовозного автомобиля (рис. 9, б). Так как удлинение и сокращения производятся непосредственно друг за другом, лесовозный автопоезд постепенно приобретает поступательную скорость, из-за чего практически не наблюдается перемещение (откат) лесовозного автомобиля (расстояние отката приблизительно равно перемещению с продольной скоростью за то же время).

В начале процессов удлинения и сокращения дышла сцепного устройства происходит резкое увеличение скорости $v_{\text{трac.}}$ лесовозного автомобиля или прицепа (рис. 11, а, б). Это обусловлено тем, что в модели изменение длины $L_{\text{сoуп.}}$ дышла производится по линейному закону, и это вызывает высокие ускорения при трогании с места лесовозного автомобиля или прицепа. Из-за этого же наблюдаются пики большой амплитуды на зависимости от времени продольной силы $F_{\text{сoуп.}}$ на дышле сцепного устройства (рис. 11, в).

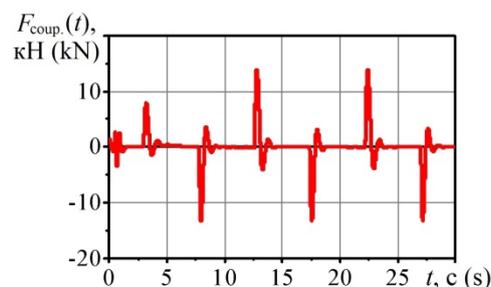
Компьютерный эксперимент продолжался не менее пяти циклов удлинения-сокращения дышла сцепного устройства, чтобы колеса лесовозного тягача с прицепом переместились по лесовозной дороге с различными геометрическими параметрами неровностей, что позволяет обеспечить достаточно качественное усреднение показателей эффективности, рассчитываемых после окончания компьютерного эксперимента. Наиболее важными факторами, влияющими на процесс самовытаскивания, являются геометрические параметры неровностей лесовозной дороги, так как именно состояние опорной поверхности приводит к затруднению движения лесовозного автопоезда и необходимости самовытаскивания. Разработанная модель позволяет изменять глубину $h_{\text{холл.}}$ неровностей лесовозной дороги и воспроизводить движение лесовозного тягача с прицепом по данному рельефу (рис. 12). Для исследования влияния глубины $h_{\text{холл.}}$ неровностей опорной поверхности проведены шесть компьютерных экспериментов, в которых $h_{\text{холл.}}$ изменялась от 0 до 0,5 м с шагом 0,1 м. При этом выдерживался



а / а



б / б



в / в

Рисунок 11. Зависимости от времени t продольной скорости тягача $v_{\text{трac.}}$ (а) и прицепа $v_{\text{трail.}}$ (б) и силы, возникающей на сцепном устройстве $F_{\text{сoуп.}}$ (в)

Figure 11. Dependences on time t of the longitudinal speed of the tractor $v_{\text{трac.}}$ (а) and trailer $v_{\text{трail.}}$ (б) and the force generated on the coupler $F_{\text{сoуп.}}$ (в)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

постоянным коэффициентом вязкого трения колес $k_{\text{visc.}}$ о поверхность в продольном направлении $k_{\text{vis.}} = 10 \text{ кН}\cdot\text{с}/\text{м}$, имитирующий взаимодействие колес с верхними слоями лесовозной дороги, находящихся в полужидком вязком состоянии. Величина хода дышла сцепного устройства в процессе выполнения этих компьютерных экспериментов принималась – 0,55 м, а скорость удлинения-сокращения дышла сцепного устройства составляла – 0,28 м/с.

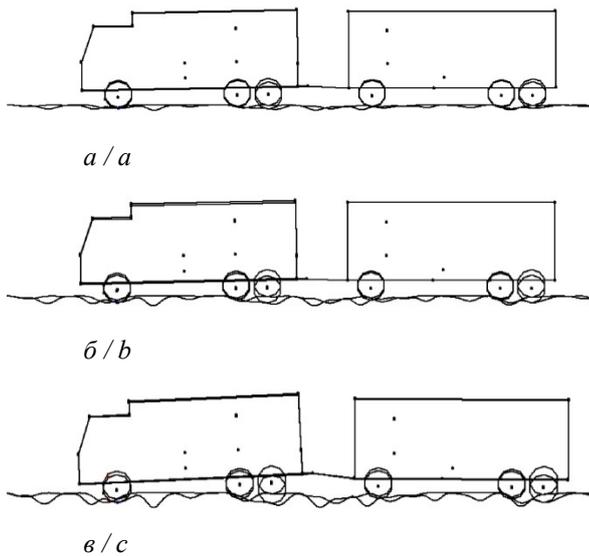


Рисунок 12. Состояние опорной поверхности и автопоезда при различных значениях средней глубины h_{depr} неровностей опорной поверхности: $a - h_{\text{depr}} = 0,2$ м; $b - h_{\text{depr}} = 0,4$ м; $c - h_{\text{depr}} = 0,6$ м

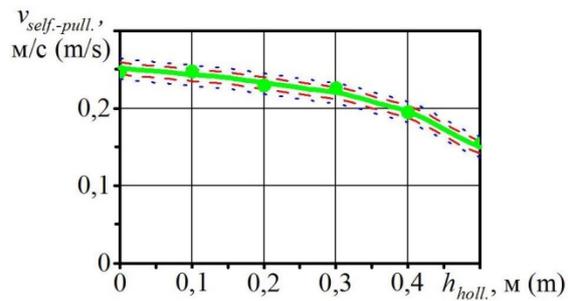
Figure 12. Condition of the supporting surface and road train at different values of the mean depth h_{depr} depressions of the supporting surface: $a - h_{\text{depr}} = 0.2$ m; $b - h_{\text{depr}} = 0.4$ m; $c - h_{\text{depr}} = 0.6$ m

Источник: собственная схема авторов

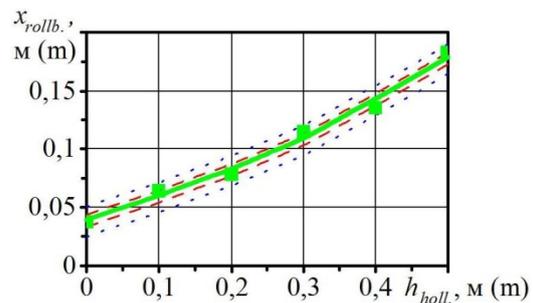
Source: authors' own schema

С увеличением глубины неровностей h_{holl} затрудняется самовытаскивание лесовозного автопоезда, что приводит к ухудшению показателей эффективности процесса самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$, x_{rollb} , N_{cons} (рис. 13). Однако при средней глубине h_{holl} неровностей опорной поверхности менее 0,3 м показатели эффективности процесса самовытаскивания составляют приемлемые величины: скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$ более 0,22 м/с (рис. 13, а), величина перемещения (отката) x_{rollb} за цикл удлинения-сокращения дышла сцепного устройства менее 0,12 м (рис. 13, б), потребляемая пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства мощность N_{cons} менее 1,9 кВт (рис. 13, в). При очень сложных дорожных условиях – средней глубине h_{holl} неровностей от 0,3 до 0,5 м – самовытаскивание лесовозного автопоезда происходит, но показатели эффективности снижаются: скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$ снижается до 0,16 м/с, перемещение (откат) x_{rollb} увеличивается до 0,17 м, потребляемая мощность N_{cons} увеличивается до 3,1 кВт (рис. 13).

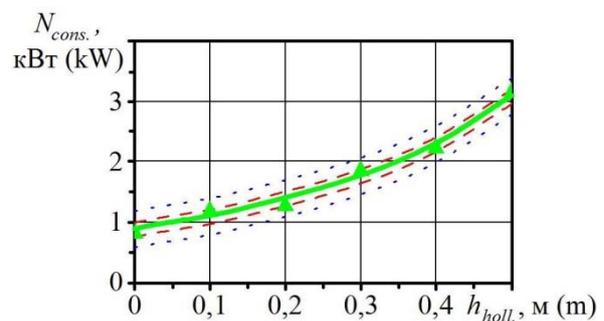
Для изучения влияния коэффициента k_{visc} вязкого трения колес лесовозного автопоезда об опорную



a / a



b / b



c / c

Рисунок 13. Влияние средней глубины h_{holl} неровностей опорной поверхности на среднюю скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull}}$ (а), величину отката назад автопоезда x_{rollb} (б) и потребляемую рекуперативным дышлом мощность N_{cons} (в)

Figure 13. Influence of average h_{holl} depth cavities of the supporting surface to the average speed of self-pulling $v_{\text{self-pull}}$ (a), the rollback value of the road train x_{rollb} (b) and the power consumed by the regenerative drawbar N_{cons} (c)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

поверхность лесовозной дороги выполнена серия компьютерных экспериментов, при осуществлении которых варьировали коэффициент k_{visc} вязкого трения колес

на уровнях 0, 5, 10, 15, 20 кН·с/м. Этот диапазон позволяет перекрыть возможные на практике состояния поверхности лесовозной дороги: от сухой (0 кН·с/м) до существенно вязкой опорной поверхности лесовозной дороги (20 кН·с/м). При этом средняя глубина h_{holl} неровностей лесовозной дороги была постоянной и составляла 0,3 м (рис. 14).

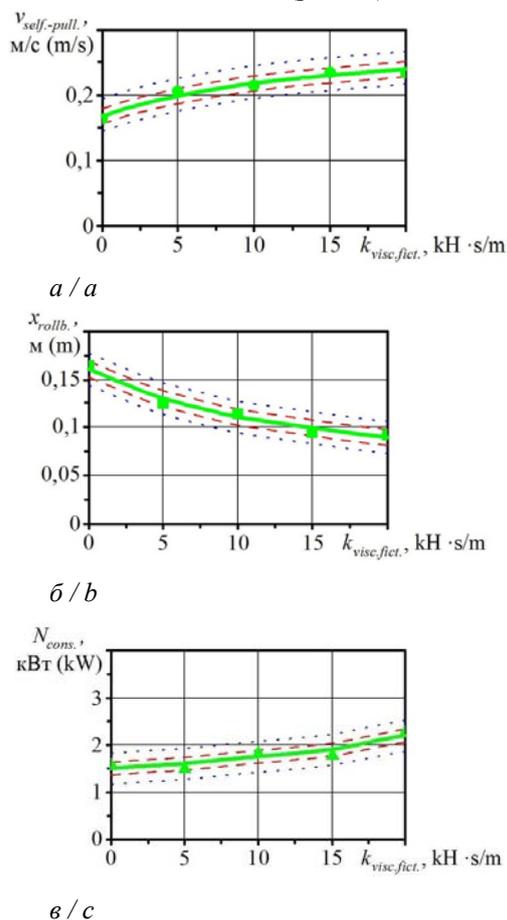


Рисунок 14. Влияние коэффициента вязкого трения $k_{\text{visc.}}$ колес автопоезда об опорную поверхность на среднюю скорость самовытаскивания $v_{\text{self-pull.}}$ (а), величину отката назад автопоезда $x_{\text{rollb.}}$ (б) и потребляемую рекуперативным дышлом мощность $N_{\text{cons.}}$ (в)

Figure 14. Influence of the coefficient of viscous friction $k_{\text{visc.}}$ of the wheels of the road train on the supporting surface to the average speed of self-pulling $v_{\text{self-pull.}}$ (a), the rollback value of the road train $x_{\text{rollb.}}$ (b) and the power consumed by the regenerative drawbar $N_{\text{cons.}}$ (c)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Выявлено, что при изменении в широких пределах коэффициента $k_{\text{visc.}}$ вязкого трения колес лесовозного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью $v_{\text{self-pull.}}$ от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) $x_{\text{rollb.}}$ от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью $N_{\text{cons.}}$ от 1,5 до 2,2 кВт (рис. 14).

возного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью $v_{\text{self-pull.}}$ от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) $x_{\text{rollb.}}$ от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью $N_{\text{cons.}}$ от 1,5 до 2,2 кВт (рис. 14).

Выводы

На основании проведенного поискового исследования выявлены наиболее значимые факторы, от которых зависит изменение транспортных расходов, затрачиваемых лесозаготовительными предприятиями на процесс доставки лесоматериалов потребителям лесовозным автомобильным транспортом. Для сокращения таких расходов, предложена перспективная конструкция дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда, обеспечивающая эффект самовытаскивания автопоезда, генерирование и накопление энергии рабочей жидкости, с последующим ее использованием в технологическом гидравлическом оборудовании.

Для имитационного моделирования движения лесовозного автопоезда, оснащенного предлагаемым дышлом сцепного устройства, и работы дышла отдельно в режимах самовытаскивания, рекуперации и демпфирования динамических нагрузок разработаны две компьютерные программы. Первая – «Программа для моделирования работы дышла сцепного устройства автопоезда в режиме рекуперации энергии». Вторая – «Программа для моделирования процесса самовытаскивания лесовозного автопоезда дышлом сцепного устройства».

Установлено, что с увеличением глубины неровностей на лесовозной дороге затрудняется самовытаскивание лесовозного автопоезда, что приводит к ухудшению показателей эффективности процесса самовытаскивания. Однако при средней глубине неровностей опорной поверхности менее 0,3 м показатели эффективности процесса самовытаскивания составляют приемлемые величины: скорость самовытаскивания более 0,22 м/с, величина перемещения (отката) за цикл удлинения-сокращения дышла сцепного устройства менее 0,12 м, потребляемая пневмогидравлическим дышлом сцепного устройства мощность менее 1,9 кВт. При очень сложных дорожных условиях – средней глубине неровностей от 0,3 до 0,5 м – самовытаскивание лесовозного автопоезда также происходит,

но показатели эффективности снижаются: скорость самовытаскивания снижается до 0,16 м/с, перемещение (откат) увеличивается до 0,17 м, потребляемая мощность увеличивается до 3,1 кВт.

Выявлено, что при изменении в широких пределах коэффициента вязкого трения колес лесовоз-

ного автопоезда об опорную поверхность лесовозной дороги, рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства обеспечивает достаточно эффективное самовытаскивание со скоростью самовытаскивания от 0,17 до 2,3 м/с, величиной перемещения (отката) от 0,09 до 0,16 м, потребляемой мощностью от 1,5 до 2,2 кВт.

Список литературы

1. Никонов, В. О. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 162-179. – Библиогр. : с. 176-178 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>
2. Matijosius J. Research Determining the Priority Order of Forces Acting on a Vehicle Transporting Logs / J. Matijosius, K. Ciziuniene, J. Liebuviene, E. Sokolovskij // Appl. Sci. 2023, 13, 6174. – Библиогр. : pp. 13-15 (43 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13106174>
3. Li H. A Fast Instance Segmentation Technique for Log End Faces Based on Metric Learning / H. Li, J. Liu, D. Wang // Forests 2023, 14, 795. – Библиогр. : pp. 12-13 (30 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14040795>
4. Moskalik T. Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport / T. Moskalik, L. Temendorf, J. V. D. Saar, G. Trzcinski // Sensors 2022, 22, 6028. – Библиогр. : pp. 14-17 (67 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166028>
5. Akay A. E. Integrated Planning of Timber Extraction and Hauling Activities by using Network 2000 Program / A. E. Akay, N. Sesen // Eur J Forest Eng 2021, 7(2) : 77-91. – Библиогр. : pp. 91 (10 titles). – DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.1038669>
6. Zemanek T. Operating Characteristics of a Timber Trailer with a Hybrid Drive / T. Zemanek, P. Prochazka, I. Pazdera, J. Neruda, V. Mergl, O. Vitek, R. Ulrich, L. Stanek // Forests 2022, 13, 1317. – Библиогр. : pp. 14-15 (26 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081317>
7. Skvor P. The Effect of Different Road Types on Timber Truck Drivers by Assessing the Load Environment of Drivers by Monitoring Changes in Muscle Tension / P. Skvor, M. Jankovsky, P. Natov, J. Dvorak, K. Zlatushka // Forests 2022, 13, 1565. – Библиогр. : pp. 15-17 (55 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101565>
8. Karha K. Fuel consumption of a high-capacity transport (HCT) vehicle combination for industrial roundwood hauling: a case study of laden timber truck combinations in Finland / K. Karha, E. Kortelainen, A. Karjalainen, H. Haavikko, T. Palander // International Journal of Forest Engineering 2023, Vol. 34, Issue 2, 10 p. – Библиогр. : pp. 9-10 (55 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2163871>
9. Andini S. The Effect of Road Conditions on Acacia mangium Timber Hauling Performance / S. Andini // Jurnal Ilmu Kehutanan 2023, Vol. 17 № 1 pp. 45-55. – Библиогр. : pp. 54-55 (40 titles). – DOI: <https://doi.org/10.22146/jik.v17i1.5288>
10. Trzcinski G. Axle Load of Round Wood Transport Vehicles in Relation to Wood Assortment / G. Trzcinski, L. Tymendorf // Environ. Sci. Proc. 2022, 22, 12. – DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13043>
11. Smidt M. F. The Potential for Effective Training of Logging Truck Drivers / M. F. Smidt, D. Mitchell, K. K. Logan // Journal of Agricultural Safety and Health, 2021 27 (1) : 29-41. – Библиогр. : pp. 37-41 (90 titles). – DOI: <https://doi.org/10.13031/jash.14084>
12. Du X. Analysis of Operating Safety of Tractor-Trailer under Crosswind in Cold Mountainous Areas / X. Du, G. Wang // Appl. Sci. 2022, 12, 12755. – Библиогр. : pp. 16-17 (29 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app122412755>
13. Audy J.-F. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review / J.-F. Audy, M. Ronnqvist, S. D. Amors, A.-D. Yahiaoui // International Journal of Forest

Engineering, 2023, Vol. 34, № 2, 143-167. – *Bibliogr.* : pp. 160-163 (122 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>

14. Anttila P. Effect of vehicle properties and driving environment on fuel consumption and CO₂ emissions of timber trucking based on data from fleet management system / P. Anttila, T. Nummelin, K. Vaatainen, J. Laitila, J. Alalilomaki, A. Kilpelainen // *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 15 (2022) 100671. – *Bibliogr.* : pp. 15 (32 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100671>

15. Liimatainen H. Impacts of increasing maximum truck weight – case Finland / H. Liimatainen, M. Pollanen, L. Nykanen // *Liimatainen et al. European Transport Research Review* (2020) 12 : 14. – *Bibliogr.* : pp. 11-12 (43 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00403-z>

16. Katreddi S. Trip Based Modeling of Fuel Consumption in Modern Heavy-Duty Vehicles Using Artificial Intelligence / S. Katreddi, A. Thiruvengadam // *Energies* 2021, 14, 8592. – *Bibliogr.* : pp. 10-12 (46 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248592>

17. Посметьев, В. И. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // *Лесной журнал*. 2019, № 4. – С. 108-123. – *Библиогр.* : с. 120-123 (20 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>

18. Патент № 2784227 Российская Федерация, МПК В60D 1/14. Рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания : № 2022124514 : заявл. 16.09.2022 : опубл. 23.11.2022 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, И. В. Сизьмин ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618813 Российская Федерация. Программа для моделирования работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания : № 2023618040 : заявл. 29.04.2023 : опубл. 29.04.2023 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, И. В. Сизьмин, В. В. Посметьев ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618814 Российская Федерация. Программа для моделирования движения автопоезда с функцией самовытаскивания : № 2023618041 : заявл. 29.04.2023 : опубл. 29.04.2023 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, И. В. Сизьмин, В. В. Посметьев ; заявитель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова.

References

1. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. V., Posmetev V. V., Chuikov A. S. *Optimizaciya konstruktivnih parametrov rekuperativnogo scepного ustroistva, ustanovlennogo v lesovoznom avtomobile s pricepom* [Optimization of the design parameters of the regenerative hitch installed in a logging vehicle with a trailer]. *Forestry journal*. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 162-179. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/11>. (In Russ.).

2. Matijosius J., Ciziuniene K., Liebuviene J., Sokolovskij E. Research Determining the Priority Order of Forces Acting on a Vehicle Transporting Logs. *Appl. Sci.* 2023, 13, 6174. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13106174>

3. Li H., Liu J., Wang D. Fast Instance Segmentation Technique for Log End Faces Based on Metric Learning. *Forests* 2023, 14, 795. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14040795>

4. Moskalik, L. Temendorf, J. V. D. Saar, G. Trzcinski Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport. *Sensors* 2022, 22, 6028. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166028>

5. Akay A. E., Sesen N. Integrated Planning of Timber Extraction and Hauling Activities by using Network 2000 Program. *Eur J Forest Eng* 2021, 7(2) : 77-91. DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.1038669>

6. Zemanek T., Prochazka P., Pazdera I., Neruda J., Mergl V., Vitek O., Ulrich R., Stanek L. Operating Characteristics of a Timber Trailer with a Hybrid Drive. *Forests* 2022, 13, 1317. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081317>

7. Skvor P., Jankovsky M., Natov P., Dvorak J., Zlatushka K. The Effect of Different Road Types on Timber Truck Drivers by Assessing the Load Environment of Drivers by Monitoring Changes in Muscle Tension. *Forests* 2022, 13, 1565. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101565>

8. Karha K., Kortelainen E., Karjalainen A., Haavikko H., Palander T. Fuel consumption of a high-capacity transport (HCT) vehicle combination for industrial roundwood hauling: a case study of laden timber truck combinations in Finland. *International Journal of Forest Engineering* 2023, Vol. 34, Issue 2, 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2163871>
9. Andini S. The Effect of Road Conditions on Acacia mangium Timber Hauling Performance. *Jurnal Ilmu Kehutanan* 2023, Vol. 17 № 1 pp. 45-55. DOI: <https://doi.org/10.22146/jik.v17i1.5288>
10. Trzeinski G., Tymendorf L. Axle Load of Round Wood Transport Vehicles in Relation to Wood Assortment. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 22, 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13043>
11. Smidt M. F., Mitchell D., Logan K. K. The Potential for Effective Training of Logging Truck Drivers. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 2021 27 (1) : 29-41. DOI: <https://doi.org/10.13031/jash.14084>
12. Du X., Wang G. Analysis of Operating Safety of Tractor-Trailer under Crosswind in Cold Mountainous Areas. *Appl. Sci.* 2022, 12, 12755. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122412755>
13. Audy J.-F., Ronnqvist M., Amors S. D., Yahiaoui A.-D. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. *International Journal of Forest Engineering*, 2023, Vol. 34, №. 2, 143-167. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
14. Anttila P., Nummelin T., Vaatainen K., Laitila J., Ala-Ilomaki J., Kilpelainen A. Effect of vehicle properties and driving environment on fuel consumption and CO₂ emissions of timber trucking based on data from fleet management system. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 15 (2022) 100671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100671>
15. Liimatainen H., Pollanen M., Nykanen L. Impacts of increasing maximum truck weight – case Finland. *Liimatainen et al. European Transport Research Review* (2020) 12 : 14. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00403-z>
16. Katreddi S., Thiruvengadam A. Trip Based Modeling of Fuel Consumption in Modern Heavy-Duty Vehicles Using Artificial Intelligence. *Energies* 2021, 14, 8592. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248592>
17. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer // *Lesnoy Zhurnal* (Russian forestry journal), 2019, № 4. – pp. 108-123. DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>
18. Posmetev V. I., e. a. *Rekuperativnoe pnevmogidravlichesкое dishlo s cepnogo ustroistva avtopoezda s funkciei samovitaskivaniya* [Recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train hitch with self-pulling function]. Patent RF, no 2784227, 2022.
19. Posmetev V. I., e. a. *Programma dlya modelirovaniya raboti rekuperativnogo pnevmogidravlichesкого dishla s cepnogo ustroistva avtopoezda s funkciei samovitaskivaniya* [Program for modeling the operation of a recuperative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function]. Certificate of state registration of the computer program RF, no 2023618813, 2023.
20. Posmetev V. I., e. a. *Programma dlya modelirovaniya dvizheniya avtopoezda s funkciei samovitaskivaniya* [A program for simulating the movement of a road train with a self-pulling function]. Certificate of state registration of the computer program RF, no 2023618814, 2023.

Сведения об авторах

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

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

Сизьмин Игорь Валерьевич – аспирант кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9035-515X>, e-mail: igorsizmin96@gmail.com.

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

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

Мозговой Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж, Российская Федерация, 394006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9835-1824>, e-mail: nv_moz@mail.ru.

Колодий Петр Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесохозяйственных дисциплин Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, ул. Мазурова – 59/34, г. Гомель, Республика Беларусь, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: pkolody@mail.ru.

Information about the authors

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

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

Sizmin Igor Valerevich – The Post-Graduate Student of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9035-515X>, e-mail: igorsizmin96@gmail.com.

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

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

Mozgovoy Nikolay Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technosphere and Fire Safety, Voronezh State Technical University, Voronezh, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh, Russian Federation, 394006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9835-1824>, e-mail: nv_moz@mail.ru.

Kolodiy Petr Vladimirovich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Disciplines, Gomel State University named after F. Skorina, st. Mazurova – 59/34, Gomel, Republic of Belarus, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: pkolody@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author