

Научная статья

УДК 630*31:621.22

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-128-141

Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного дышла лесовозного автопоезда

В.О. Никонов[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

В.И. Посметьев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

А.Ю. Мануковский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

В.В. Посметьев, канд. физ.-мат. наук, доц.; ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

И.В. Сизьмин, аспирант; ResearcherID: [IWE-3107-2023](https://orcid.org/0000-0002-9035-515X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; 8888nike8888@mail.ru[✉], posmetyev@mail.ru, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru, igorsizmin96@gmail.com

Поступила в редакцию 29.09.23 / Одобрена после рецензирования 18.12.23 / Принята к печати 20.12.23

Аннотация. Рассмотрены основные преимущества и особенности взаимодействия звеньев лесовозного автопоезда при движении в процессе вывозки лесоматериалов по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам. На основе анализа результатов выполненных российскими и зарубежными авторами исследований выявлены перспективные пути повышения эффективности работы лесовозных автомобилей с прицепами. Представлены главные недостатки существующих конструкций тягово-сцепных устройств лесовозных автомобилей с прицепами. Предложена усовершенствованная конструкция рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда, обеспечивающая снижение максимальных усилий при динамическом взаимодействии звеньев, повышение надежности автопоезда, возможность рекуперации энергии рабочей жидкости с ее последующим полезным использованием, а также эффект самовытаскивания автопоезда, улучшающий его проходимость в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Выявлено, что оптимальный внутренний диаметр последовательно соединенных свободными торцами 2 гидроцилиндров двухстороннего действия находится в диапазоне 95...105 мм. При таком диаметре рекуперированная мощность достигает 4 кВт, среднее продольное ускорение прицепа находится в диапазоне 0,75...0,83 м/с². Движение лесовозного автопоезда в исследуемых условиях со скоростью 20...60 км/ч сопровождается изменением средней рекуперированной мощности от 1,8 до 11,3 кВт и среднего продольного ускорения прицепа – от 0,2 до 1,4 м/с². Определено, что при средних высотах неровностей опорной поверхности 0,1...0,2 м, характерных для типичных недостаточно обустроенных лесовозных дорог, средняя рекуперированная мощность составляет 2,2...4,1 кВт, среднее продольное ускорение прицепа – 0,26...0,53 м/с². Оптимальный ход рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда равняется 0,55 м, оптимальная скорость удлинения (или укорочения) дышла сцепного устройства –

0,28 м/с. При этом обеспечивается средняя скорость самовытаскивания 0,22 м/с, среднее перемещение лесовозного автопоезда 0,11 м за один цикл удлинения (или укорочения) дышла и рекуперированная им мощность 1,75 кВт.

Ключевые слова: лесовозный автомобиль, гидроцилиндр двухстороннего действия, прицеп, рекуперация энергии, функция самовытаскивания, оптимизация параметров, компьютерный эксперимент, картограмма оптимизации, пневмогидроаккумулятор, лесовозная дорога, эффективность системы

Для цитирования: Никонов В.О., Посметьев В.И., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Сизьмин И.В. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного дышла лесовозного автопоезда // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 128–141. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-128-141>

Original article

Optimization of the Design Parameters of the Regenerative Rod of a Logging Road Train

Vadim O. Nikonov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Valeryi I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Andrey Yu. Manukovskii, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Igor V. Sizmin, Postgraduate Student; ResearcherID: [IWE-3107-2023](https://orcid.org/0000-0002-9035-515X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; 8888nike8888@mail.ru[✉], posmetyev@mail.ru, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru, igorsizmin96@gmail.com

Received on September 29, 2023 / Approved after reviewing on December 18, 2023 / Accepted on December 20, 2023

Abstract. The main advantages and peculiarities of the interaction of the links of a logging road train when moving during wood hauling along under-equipped logging roads are considered. Based on the analysis of the results of the research carried out by Russian and foreign authors, promising ways to improve the efficiency of logging trucks with trailers have been identified. The main disadvantages of the existing designs of the devices for coupling logging trucks with trailers have been presented. An improved design of the regenerative pneumohydraulic rod of the coupler of a road train has been proposed, which ensures a reduction in the maximum efforts during the dynamic interaction of the links, an increase in the road train reliability, the possibility of the power fluid energy recovery with its subsequent beneficial use, as well as the effect of self-pulling of the road train, improving its cross-country ability in the conditions of under-equipped logging roads. It has been revealed that the optimal internal diameter of 2 double-acting hydraulic cylinders connected in series with the free ends is within the range of 95 to 105 mm. With such a diameter, the recovered power reaches 4 kW, the average longitudinal acceleration of the trailer is in the range of

0.75 to 0.83 m/s². The movement of a logging road train in the studied conditions at a speed of 20 to 60 km/h is accompanied by a change in the average recovered power from 1.8 to 11.3 kW and the average longitudinal acceleration of the trailer – from 0.2 to 1.4 m/s². It has been determined that at average heights of support surface irregularities of 0.1 to 0.2 m, characteristic of typical under-equipped logging roads, the average recovered power is in the range of 2.2 to 4.1 kW and the average longitudinal acceleration of the trailer is in the range of 0.26 to 0.53 m/s². The optimal stroke of the regenerative pneumohydraulic rod of the coupler of a road train is 0.55 m, the optimal rate of lengthening (or shortening) of the rod is 0.28 m/s. This ensures the average self-pulling speed of 0.22 m/s, the mean displacement of a logging road train of 0.11 m per one cycle of lengthening (or shortening) of the rod and the power recovered by the rod of 1.75 kW.

Keywords: logging truck, double-acting hydraulic cylinder, trailer, energy recovery, self-pulling function, optimization of parameters, computer experiment, optimization cartogram, pneumohydraulic accumulator, logging road, system efficiency

For citation: Nikonov V.O., Posmetyev V.I., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V., Sizmin I.V. Optimization of the Design Parameters of the Regenerative Rod of a Logging Road Train. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 128–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-128-141>

Введение

Значительная роль в обеспечении бесперебойной работы лесозаготовительных предприятий отводится лесовозному автомобильному транспорту – важнейшему звену лесозаготовительного процесса. Более широкое практическое применение лесовозных автомобилей с прицепами является значительным резервом повышения объемов вывозимых лесовозным автомобильным транспортом лесоматериалов. К отличительным особенностям эксплуатации лесовозных автомобилей с прицепами относят их функционирование в сложных дорожных условиях, характеризующееся преодолением неровностей и препятствий. Эти особенности приводят к ухудшению проходимости машины и прицепа, снижению производительности, большим динамическим нагрузкам между звеньями, сопровождающимся уменьшением надежности и долговечности автопоезда, повышенным расходом топлива и, как следствие, возрастанием себестоимости вывозки лесоматериалов [4].

Анализ результатов проведенных российскими и зарубежными авторами исследований в области повышения эффективности функционирования лесовозных автомобилей с прицепами позволил установить, что значительное улучшение их работы может быть достигнуто за счет: оптимального количества лесовозных автопоездов в автопарке, оснащенных гидроманипуляторами; оптимизации конструктивных и рабочих параметров гидроманипуляторов; синхронности осуществления погрузки, вывозки и разгрузки лесоматериалов; полноты загрузки осей автопоезда, а также равномерности распределения между ними нагрузки; количественного учета изменения весовых характеристик лесоматериалов при их хранении и вывозке в зависимости от природно-климатических условий; обеспече-

ния необходимого уровня обустроенности лесовозных дорог, а также беспрепятственного проезда для выполнения погрузочно-разгрузочных работ; использования глобального позиционирования при определении оптимальных маршрутов вывозки лесоматериалов; применения деталей в конструкции автопоезда, изготовленных из современных легких и долговечных материалов; удаленного контроля изменения технического состояния агрегатов и систем лесовозного автомобиля с прицепом; минимальных простоев в сочетании с более качественными ремонтом и техническим обслуживанием лесовозных автопоездов; задействования в процессе вывозки лесоматериалов специально подготовленных водителей; применения альтернативных видов топлива; преобразования, накопления и повторного полезного использования потенциальной и кинетической энергии массы звеньев автопоезда, рассеиваемой в виде тепла в окружающее пространство [8–20].

Практика эксплуатации лесовозных автомобилей с прицепами свидетельствует о том, что уровень продольных колебаний между лесовозным автомобилем и прицепом является одним из факторов, определяющих скорость движения лесовозного автопоезда, производительность, утомляемость водителя, интенсивность износа и разрушения сопряженных деталей тягово-сцепного устройства, а также деталей ходовой части лесовозного автомобиля и прицепа. Существенное влияние на продольные колебания между лесовозным автомобилем и прицепом оказывает тягово-сцепное устройство, рассеивающее во внешнюю среду тепловую энергию, образующуюся в процессе преодоления сил внешнего и внутреннего трения при динамическом взаимодействии звеньев. Типовые конструкции тягово-сцепных устройств на современных лесовозных автомобилях с прицепами не обеспечивают требуемого снижения динамических нагрузок между звеньями автопоезда при преодолении им неровностей и препятствий. Это является основной причиной неоправданного снижения срока службы дорогостоящих лесовозных автомобилей с прицепами. Таким образом, разработка и усовершенствование существующих конструкций тягово-сцепных устройств для лесовозных автомобилей с прицепами – актуальная область исследований [7].

Для снижения максимальных усилий при динамическом взаимодействии звеньев лесовозного автопоезда авторами предложена конструкция дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания (рис. 1). Использование такого дышла улучшает проходимость лесовозного автопоезда при преодолении неровностей и препятствий, позволяет генерировать и полезно использовать энергию рабочей жидкости, повышает надежность автопоезда за счет демпфирования динамических нагрузок, возникающих между звеньями [5].

Для исследования демпфирования и рекуперации энергии рабочей жидкости предлагаемым устройством, а также установления влияния его конструктивных параметров на эффективность самовытаскивания лесовозного автопоезда целесообразно использовать методы математического и компьютерного моделирования, а также метод многофакторной оптимизации [1–3].

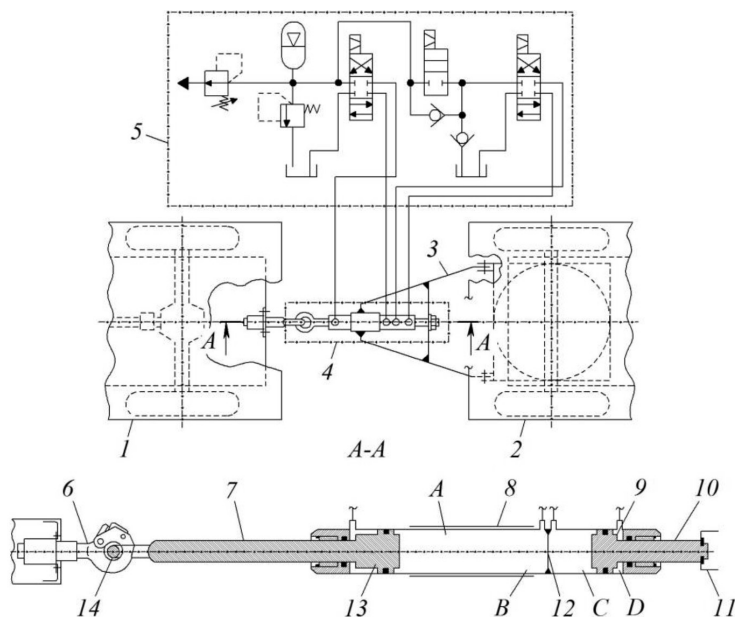


Рис. 1. Схема рекуперативного дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания для лесовозного автомобиля с прицепом: 1 – лесовозный автомобиль; 2 – прицеп; 3 – дышло; 4 – гидроцилиндр; 5 – рекуперативный гидропривод управления; 6 – крюк; A, D и B, C – штоковые и поршневые полости гидроцилиндра соответственно; 7, 10 и 9, 13 – штоки и поршни гидроцилиндра соответственно; 8 – корпус дышла; 11 – поперечина дышла; 12 – герметичная перегородка гидроцилиндра; 14 – присоединительное кольцо

Fig. 1. The diagram of the regenerative rod of the coupler with self-pulling function for a logging truck with a trailer: 1 – logging truck; 2 – trailer; 3 – rod; 4 – hydraulic cylinder; 5 – regenerative hydraulic control; 6 – hook; A, D and B, C – rod and head ends of the hydraulic cylinder, respectively; 7, 10 and 9, 13 – rods and pistons of the hydraulic cylinder, respectively; 8 – rod body; 11 – cross-piece of the rod; 12 – sealed bulkhead of the hydraulic cylinder; 14 – connecting ring

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является лесовозный автомобиль с прицепом. Предметом – конструкция дышла сцепного устройства, обеспечивающая эффект самовытаскивания автопоезда, рекуперацию энергии рабочей жидкости и снижение динамических нагрузок на тягач и прицеп. Для изучения особенностей функционирования конструкции дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда разработаны математические модели и компьютерные программы, реализующие эти модели [6].

При анализе эффективности работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда применялись

2 показателя: рекуперлируемая мощность N_p и продольное ускорение прицепа $a_{п}$, характеризующее плавность хода лесовозного автопоезда.

Мгновенное значение рекуперлируемой мощности определялось для момента времени t следующим образом:

$$N_p(t) = d_0 \left(\frac{D_{гн}}{D_{гн0}} \right)^2 \left(\frac{dL_{AB}(t)}{dt} \right)^2,$$

где d_0 – эффективный коэффициент демпфирования; $D_{гн}$ – текущий внутренний диаметр последовательно соединенных торцами 2 гидроцилиндров двухстороннего действия (далее – гидроцилиндр дышла) в компьютерном эксперименте; $D_{гн0}$ – внутренний диаметр гидроцилиндра дышла, в базовом варианте $D_{гн0} = 80$ мм; L_{AB} – длина дышла сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом.

Мгновенное продольное ускорение прицепа $a_{п}(t)$, средние рекуперлируемую мощность $N_{p,c}$ и продольное ускорение $a_{п,c}$ прицепа рассчитывали по методике [6].

Для исследования влияния параметров рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда на эффективность самовытаскивания решена задача многофакторной оптимизации (см. таблицу). Факторами оптимизации являлись: ход дышла ΔL сцепного устройства; скорость удлинения (или укорочения) дышла v_d . В качестве критериев оптимизации использовали параметры, определяющие интенсивность процесса самовытаскивания и затраты мощности: среднюю скорость самовытаскивания $v_{св}$; перемещение (откат) назад $x_{от}$ лесовозного автопоезда; потребляемую дышлом сцепного устройства мощность $N_{п}$. Для оптимизации параметров дышла сцепного устройства проведена серия из 9 компьютерных экспериментов, в процессе которых задавали ход дышла – 0,4; 0,8; 1,2 м и скорость удлинения (или укорочения) дышла – 0,1; 0,2; 0,3 м/с.

Результаты компьютерных экспериментов по многофакторной оптимизации геометрических параметров дышла сцепного устройства

The results of computer experiments on multifactor optimization of the geometric parameters of the coupler rod

Ход дышла сцепного устройства, м	Скорость удлинения/ укорочения дышла сцепного устройства, м/с	Средняя скорость самовытаскивания лесовозного автопоезда, м/с	Перемещение назад лесовозного автопоезда, м	Расходуемая дышлом сцепного устройства мощность, кВт
0,4	0,1	0,053	0,189	0,377
	0,2	0,135	0,130	0,929
	0,3	0,225	0,102	1,574
0,8	0,1	0,071	0,229	0,613
	0,2	0,160	0,157	1,509
	0,3	0,255	0,118	2,557
1,2	0,1	0,078	0,270	0,814
	0,2	0,168	0,194	2,005
	0,3	0,265	0,140	3,396

Аналитически задачу оптимизации параметров рекуперативного дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания можно записать в виде следующей системы:

$$\begin{cases} v_{\text{св}}(\Delta L, v_{\text{д}}) \rightarrow \max; \\ x_{\text{от}}(\Delta L, v_{\text{д}}) \rightarrow \min; \Rightarrow \Delta L^{\text{опт}}, v_{\text{д}}^{\text{опт}}, \\ N_{\text{п}}(\Delta L, v_{\text{д}}) \rightarrow \min; \end{cases}$$

где $\Delta L^{\text{опт}}$, $v_{\text{д}}^{\text{опт}}$ – оптимальные ход и скорость удлинения (или укорочения) рекуперативного дышла.

Задача оптимизации считается решенной, если определена область в факторном пространстве $(\Delta L, v_{\text{д}})$, в которой одновременно будут максимальной $v_{\text{св}}$ и минимальными $x_{\text{от}}$ и $N_{\text{п}}$.

На основе полученных в компьютерных экспериментах данных (табл. 1) найдены аналитические выражения для функций $v_{\text{св}}(\Delta L, v_{\text{д}})$, $x_{\text{от}}(\Delta L, v_{\text{д}})$ и $N_{\text{п}}(\Delta L, v_{\text{д}})$. Аналитические выражения имеют вид многочленов 2-го порядка, позволяющих не только интерполировать результаты эксперимента, но и сгладить случайный разброс:

$$v_{\text{св}}(\Delta L, v_{\text{д}}) = -0,051\Delta L^2 + 0,326v_{\text{д}}^2 + 0,094\Delta Lv_{\text{д}} + 0,104\Delta L + 0,701v_{\text{д}} - 0,059;$$

$$x_{\text{от}}(\Delta L, v_{\text{д}}) = 0,001\Delta L^2 + 1,503v_{\text{д}}^2 - 0,248\Delta Lv_{\text{д}} + 0,125\Delta L - 0,95v_{\text{д}} + 0,229;$$

$$N_{\text{п}}(\Delta L, v_{\text{д}}) = -0,274\Delta L^2 + 7,416v_{\text{д}}^2 + 8,658\Delta Lv_{\text{д}} + 0,096\Delta L - 0,356v_{\text{д}} - 0,0022.$$

Данные аналитические выражения можно использовать в инженерной практике для предварительного определения (без выполнения компьютерных расчетов) показателей эффективности рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства по ходу и по скорости движения дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда.

Результаты исследования и их обсуждение

Внутренний диаметр гидроцилиндра рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания оказывает значительное воздействие на рекуперированную мощность, а также на плавность хода лесовозного автомобиля с прицепом. Для изучения влияния внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла на исследуемые показатели в специализированной компьютерной программе были выполнены эксперименты. При проведении этих экспериментов в интерфейсную форму программы последовательно вносились в интервале от 60 до 120 мм значения внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла с шагом 10 мм. Выявлено, что оптимальный внутренний диаметр гидроцилиндра дышла составляет

100 мм (рис. 2). При этом обеспечивается рекуперлируемая мощность до 4,05 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,79 м/с².

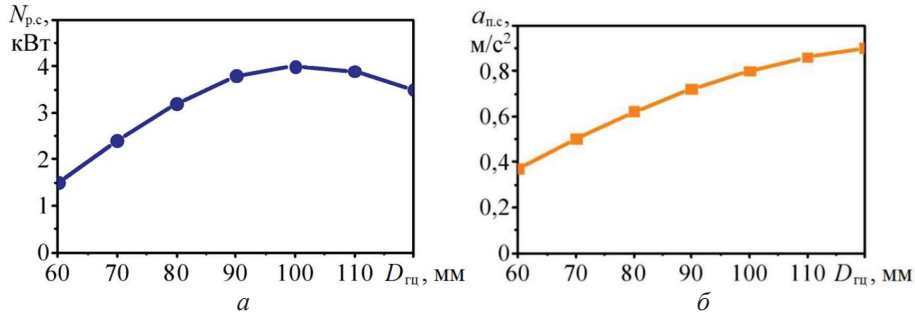


Рис. 2. Графики изменения средних рекуперлируемой мощности (а) и продольного ускорения прицепа (б) при увеличении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла

Fig. 2. The graphs of changes in the average recovered power (a) and longitudinal acceleration of the trailer (b) with an increase in the inner diameter of the rod hydraulic cylinder

При увеличении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла требуются большие механические силы для перемещения поршней в таком гидроцилиндре, т. е. повышается эффективная жесткость рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания. Из-за этого снижается рекуперлируемая мощность – с 4,05 до 3,55 кВт при увеличении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла от 100 до 120 мм, а также возрастает среднее продольное ускорение – от 0,79 до 0,91 м/с².

При меньшем внутреннем диаметре гидроцилиндра дышла ниже объем расходуемой жидкости при том же перемещении поршней в гидроцилиндре, поэтому при уменьшении внутреннего диаметра со 100 до 60 мм рекуперлируемая мощность $N_{р.с.}$ понижается с 4,05 до 1,45 кВт. При аналогичном уменьшении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла падает и продольное ускорение прицепа $a_{п.с.}$ – с 0,79 до 0,38 м/с². Оптимальный внутренний диаметр такого гидроцилиндра дышла составляет 95...105 мм и обеспечивает генерацию рекуперлируемой мощности $N_{р.с.}$, равную 4 кВт. Продольные ускорения прицепа при этом возрастают, достигая 0,83 м/с².

С ростом скорости лесовозного автопоезда, движущегося по неровностям лесовозной дороги, происходит более частое взаимодействие его звеньев между собой, сопровождающееся увеличением количества перемещений поршней в гидроцилиндре дышла. Это приводит к росту генерирования дышлом сцепного устройства рекуперлируемой мощности. Для исследования влияния данного фактора на показатели эффективности выполнена серия компьютерных экспериментов, при проведении которых скорость движения автопоезда увеличивали в интервале 20...60 км/ч с шагом 10 км/ч. Эти эксперименты позволили установить, что рост скорости движения автопоезда с 0 до 40 км/ч сопровождается изменением по степенному закону рекуперлируемой мощности (рис. 3, а). При последующем повышении в компьютерном эксперименте

скорости движения лесовозного автомобиля с прицепом с 40 до 60 км/ч прослеживается снижение темпа увеличения рекуперированной мощности $N_{p.c}$. График, аналогичный показанному на рис. 3, а, получен при выполнении компьютерных экспериментов по исследованию изменения среднего ускорения прицепа (рис. 3, б). Что касается всего изучаемого диапазона изменения скорости движения лесовозного автопоезда, то рекуперированная мощность $N_{p.c}$ изменяется от 1,8 до 11,3 кВт, а продольное ускорение прицепа $a_{п.с}$ – от 0,2 до 1,4 м/с².

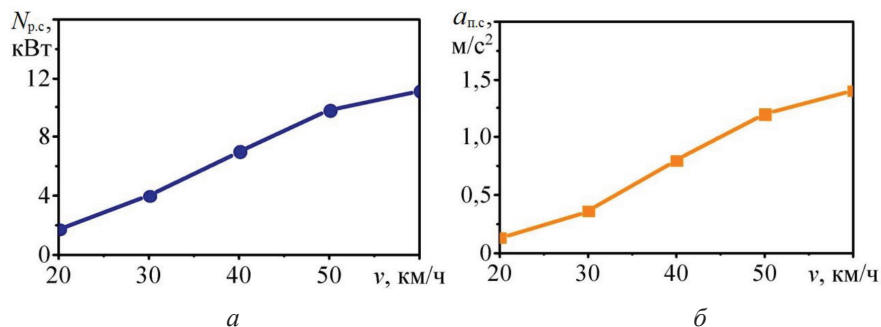


Рис. 3. Графики изменения средних рекуперированной мощности (а) и продольного ускорения прицепа (б) при увеличении скорости v лесовозного автопоезда

Fig. 3. The graphs of changes in the average recovered power (a) and longitudinal acceleration of the trailer (b) with an increase in the speed v of the logging road train

С ухудшением уровня обустроенности лесовозной дороги, характеризующимся возрастанием величин неровностей и препятствий на опорной поверхности, можно ожидать большую амплитуду перемещений поршней в гидроцилиндре рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства и, соответственно, большую рекуперированную мощность. Для изучения влияния средней величины неровностей опорной поверхности лесовозной дороги выполнены компьютерные эксперименты, при которых величина неровностей повышалась с шагом 0,1 м в диапазоне 0...0,5 м. Установлено, что изменение рекуперированной дышлом сцепного устройства мощности $N_{p.c}$ при увеличении неровностей опорной поверхности происходит по степенному закону (рис. 4, а). Продольное ускорение $a_{п.с}$ изменяется по закону, близкому к линейному (рис. 4, б). Анализ данной серии компьютерных экспериментов позволил отметить, что при средних высотах неровностей опорной поверхности 0,1...0,2 м, характерных для типичных недостаточно обустроенных лесовозных дорог, средняя рекуперированная мощность составляет 2,2...4,1 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа – 0,26...0,53 м/с². На всем исследуемом диапазоне неровностей лесовозной дороги при движении по ней лесовозного автопоезда гидроцилиндр дышла сцепного устройства позволяет рекуперировать мощность 1,8...7,5 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,2...0,8 м/с².

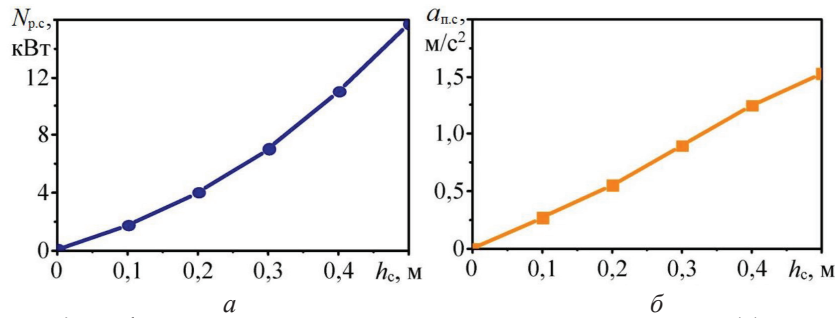


Рис. 4. Графики изменения средних рекуперированной мощности (а) и продольного ускорения прицепа (б) при увеличении средней высоты неровностей h_c лесовозной дороги

Fig. 4. The graphs of changes in the average recovered power (a) and longitudinal acceleration of the trailer (b) with an increase in the average height of irregularities h_c of the logging road

При анализе функций $v_{св}(\Delta L, v_d)$, $x_{от}(\Delta L, v_d)$ и $N_{п}(\Delta L, v_d)$ построены графики (рис. 5) и картограммы (рис. 6), которые позволяют визуально выявить тенденции влияния параметров рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом на показатели его эффективности. Они определены по картограммам оптимизации графоаналитическим методом.

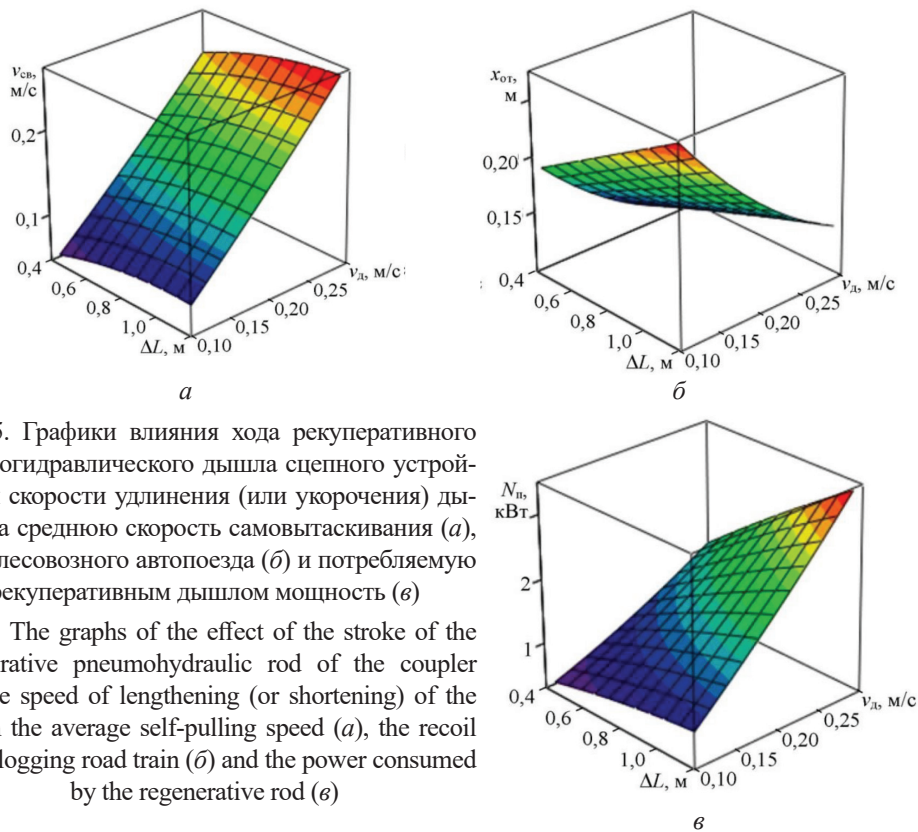


Рис. 5. Графики влияния хода рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства и скорости удлинения (или укорочения) дышла на среднюю скорость самовытаскивания (а), откат лесовозного автопоезда (б) и потребляемую рекуперативным дышлом мощность (в)

Fig. 5. The graphs of the effect of the stroke of the regenerative pneumohydraulic rod of the coupler and the speed of lengthening (or shortening) of the rod on the average self-pulling speed (a), the recoil of the logging road train (b) and the power consumed by the regenerative rod (v)

На рис. 6, *a* приведен пример использования картограммы. Из точек, обозначающих ход дышла 0,6 м (точка *A*) и скорость удлинения (укорочения) дышла 0,2 м/с (точка *B*), проводим перпендикуляры и находим точку их пересечения *C*, размещенную на линии уровня $v_{св} = 0,15$ м/с. Аналогично определяются показатели $x_{от}$ и $N_{п}$.

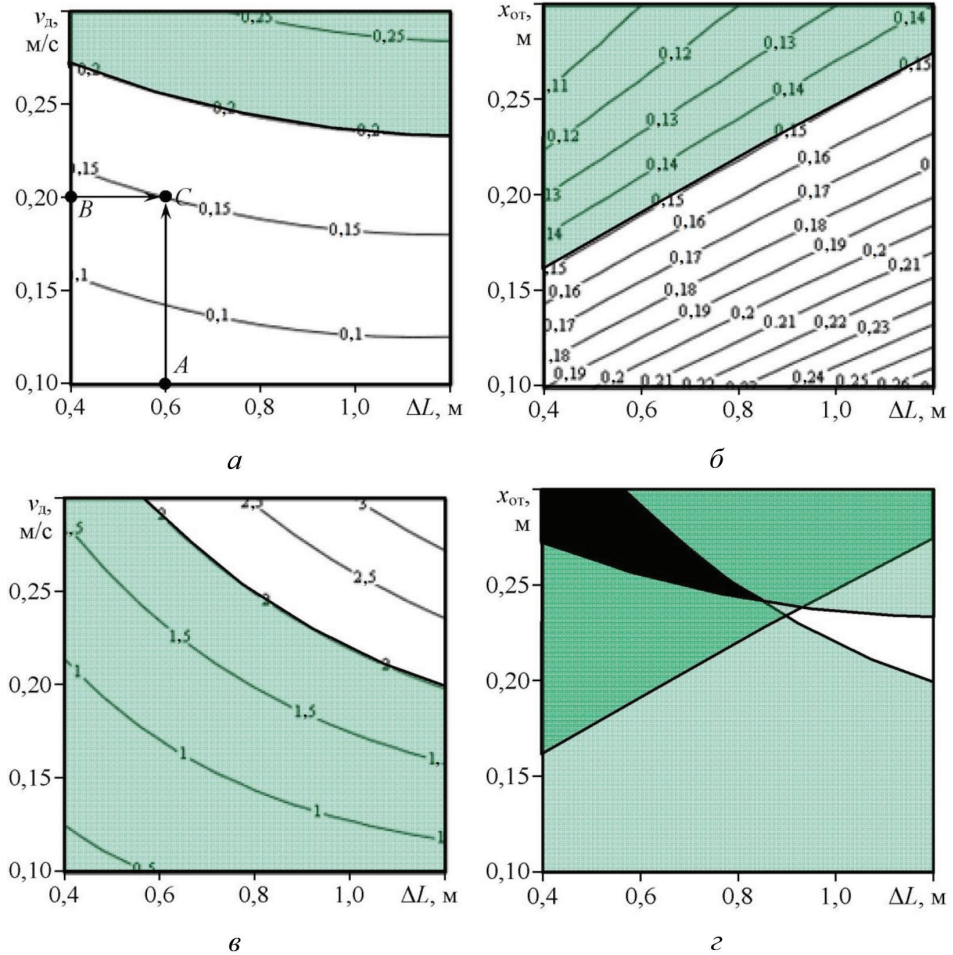


Рис. 6. Картограммы оптимизации: *a* – $v_{св}(\Delta L, v_d)$, м/с; *b* – $x_{от}(\Delta L, v_d)$, м; *c* – $N_{п}(\Delta L, v_d)$, кВт; *d* – оптимальная область

Fig. 6. The optimization cartograms: *a* – $v_{св}(\Delta L, v_d)$, m/s; *b* – $x_{от}(\Delta L, v_d)$, m; *c* – $N_{п}(\Delta L, v_d)$, kW; *d* – optimal area

На каждой из 3 картограмм $v_{св}(\Delta L, v_d)$, $x_{от}(\Delta L, v_d)$ и $N_{п}(\Delta L, v_d)$ можно выделить благоприятную область факторного пространства $(\Delta L, v_d)$, в которой соответствующий критерий имеет наилучшие значения. На картограмме $v_{св}(\Delta L, v_d)$ линия уровня $v_{св} = 0,20$ м/с разграничивает благоприятную и неблагоприятную области (рис. 6, *a*). Основным критерием отнесения области к благоприятной является возможность пересечения областей и формирования достаточно обширной общей оптимальной области (рис. 6, *d*). Для критериев $x_{от}$ и $N_{п}$ в качестве линий уровня, отделяющих друг от друга благо-

приятную и неблагоприятную области, приняты соответственно $x_{от} = 0,15$ м (рис. 6, б) и $N_{п} = 2$ кВт (рис. 6, в).

Полученная оптимальная область (рис. 6, з), обозначенная черным цветом, позволяет заключить, что оптимальный ход дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда с функцией самовытаскивания лежит в диапазоне 0,4...0,7 м; оптимальная скорость удлинения (сокращения) дышла сцепного устройства – в диапазоне 0,25...0,30 м/с. Ориентируясь на центр затемненной области, можно рекомендовать в качестве точечных значений оптимальных параметров $\Delta L = 0,55$ м, $v_{д} = 0,28$ м/с. При этом обеспечивается средняя скорость самовытаскивания 0,22 м/с, средний откат лесовозного автопоезда 0,11 м за один цикл удлинения (или укорочения) дышла и рекуперлируемая им мощность 1,75 кВт.

Выводы

Результаты исследования особенностей функционирования рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства при преодолении лесовозным автомобилем с прицепом препятствий и неровностей на временной лесовозной дороге дают возможность сделать следующие выводы.

1. Оптимальный внутренний диаметр гидроцилиндра дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания составляет 95...105 мм. При этом обеспечивается средняя рекуперлируемая мощность 4 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,75...0,83 м/с². Увеличение скорости движения автопоезда с 20 до 60 км/ч сопровождается ростом рекуперлируемой мощности – с 1,8 до 11,3 кВт и продольного ускорения прицепа – с 0,2 до 1,4 м/с².

2. Анализ серии компьютерных экспериментов позволил установить, что при средних высотах неровностей опорной поверхности 0,1...0,2 м, характерных для типичных недостаточно обустроенных лесовозных дорог, средняя рекуперлируемая мощность составляет 2,2...4,1 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа – 0,26...0,53 м/с². На всем исследуемом диапазоне неровностей лесовозной дороги (0...0,5 м) при движении по ней лесовозного автопоезда гидроцилиндр дышла сцепного устройства рекуперлирует мощность 1,8...7,5 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,2...0,8 м/с².

3. Оптимальный ход рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда составляет 0,55 м, оптимальная скорость удлинения (или укорочения) дышла сцепного устройства – 0,28 м/с. При этом обеспечивается средняя скорость самовытаскивания 0,22 м/с, средний откат лесовозного автопоезда 0,11 м за один цикл удлинения–укорочения дышла и потребляемая рекуперативным дышлом мощность 1,75 кВт.

4. Использование предлагаемого рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства позволит снизить максимальные усилия при динамическом взаимодействии звеньев лесовозного автопоезда, повысить его надежность, рекуперировать энергию рабочей жидкости с последующим полезным использованием, а также обеспечит лесовозному автопоезду эффект самовытаскивания, что улучшит его проходимость при преодолении препятствий на временных лесовозных дорогах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planning an Experiment in the Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).
2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
Granovskiy V.A., Siraya T.N. *Methods of Processing Experimental Data in Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).
3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 272 с.
Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Terms of Basic, Fortran and Pascal*. Tomsk, MP "RASKO" Publ., 1991. 272 p. (In Russ.).
4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 203 с.
Nikonov V.O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*. Voronezh, VSUFT Publ., 2021. 203 p. (In Russ.).
5. Патент № 2784227 С1 РФ, МПК В60D 1/14, В60D 1/145, В60D 1/155. Рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания: № 2022124514; заявл. 16.09.2022; опублик. 23.11.2022 / В.И. Посметьев, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, И.В. Сизьмин.
Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V., Sizmin I.V. *Regenerative Pneumohydraulic Rod of the Coupler of A Road Train with Self-Pulling Function*. Patent RF, no. RU 2784227 C1, 2022. (In Russ.).
6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Сизьмин И.В. Имитационная модель оценки эффективности лесовозного автопоезда, оснащенного рекуперативным пневмогидравлическим тягово-сцепным устройством // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 181–196.
Posmeteyev V.I., Nikonov V.O., Posmeteyev V.V., Sizmin I.V. Simulation Model for Estimation of Forest Truck Performance Equipped with Recuperative Spring-Hydraulic Fifth-Wheel Coupling. *Lesotekhnicheskij Zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 181–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>
7. Посметьев В.И., Никонов В.О., Сизьмин И.В. Повышение эффективности лесовозного автопоезда путем использования рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства // Воронеж. науч.-техн. вестн. 2022. Т. 4, № 4(38). С. 70–85.
Posmetev V.I., Nikonov V.O., Siz'min I.V. Improving the Efficiency of the Forest Trading by Using a Recuperative Pneumatic Hydraulic Coupling Device. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij vestnik = Voronezh Scientific-Technical Bulletin*, 2022, vol. 4, no. 4(38), pp. 70–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-70-85>
8. Alrejjal A., Ksaibati K. Impact of Crosswinds and Truck Weight on Rollover Propensity when Negotiating Combined Curves. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022, vol. 12, iss. 1, pp. 86–102. <http://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.01.001>
9. Bako S., Ige B., Nasir A., Musa N.A. Stability Analysis of a Semi-Trailer Articulated Vehicle: A Review. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2021, vol. 5, iss. 2, pp. 131–140. <http://doi.org/10.30939/ijastech.855733>
10. Brown M.W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight on Payload Efficiency: An Australian Case Study. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 7, art. no. 855. <http://doi.org/10.3390/f12070855>

11. Ghaffariyan M.R., Barrier C., Brown M.W., Kuehmaier M., Acuna M. A Short Review of Timber Truck Fuel Consumption Studies. *Australian Forests Operations Research Alliance (AFORA) Industry Bulletin*, 2018, vol. 21.
12. Johannes E., Ekman P., Hüge-Brodin M., Karlsson M. Sustainable Timber Transport – Economic Aspects of Aerodynamic Reconfiguration. *Sustainability*, 2018, vol. 10, no. 6, art. no. 1965. <http://doi.org/10.3390/su10061965>
13. Kogler C., Stenitzer A., Rauch P. Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 12, art. no. 1245. <http://doi.org/10.3390/f11121245>
14. Korpinen O.-J., Aalto M., Venäläinen P., Ranta T. Impacts of a High-Capacity Truck Transportation System on the Economy and Traffic Intensity of Pulpwood Supply in Southeast Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2019, vol. 40, iss. 1, pp. 89–105.
15. Lachini E., Fiedler N., Silva G., Pinheiro C., Carmo F. Operational Analysis of Forestry Transportation Using Self-Loading Trucks in a Mountainous Region. *Floresta e Ambiente*, 2018, vol. 25, iss. 4, art. no. e20150060. <http://doi.org/10.1590/2179-8087.006015>
16. Mitrofanovs I., Cekule M. Effective Collaboration Research Project on IT Solution for Automatic Measurement of Timber Assortment. *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 78–83.
17. Monti C.A.U., Gomide L.R., Oliveira R.M., Franca L.C.J. Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2020, vol. 92, iss. 3, art. no. e20200263. <http://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263>
18. Moreno G., Manenti V., Guerero G., Nicolazzi L., Vieira R., Martins D. Stability of Heavy Articulated Vehicles: Effect of Load Distribution. *Transportation Research Procedia*, 2018, vol. 33, pp. 211–218. <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>
19. Schettino S., Minette L.J., Schettino C.F., Reboleto I.D. Feasibility Analysis of the Use of Light and Medium Trucks in Timber Transport in Rural Properties. *Revista Árvore*, 2018, vol. 42, iss. 6, art. no. e420608. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000600008>
20. Trzeciński G., Moskalik T., Wojtan R. Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo. *Forests*, 2018, vol. 9, no. 4, art. no. 164. <http://doi.org/10.3390/f9040164>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest