

Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>

УДК 629.11.001



ДВУХОСНЫЕ СОЧЛЕНЕННЫЕ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСЕКИ: ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ

Виктор В. Гудков¹, gydvik-51@yandex.ru 0000-0002-4691-7047

Павел А. Сокол¹, pavsokol@yandex.ru 0000-0001-6090-7008

Александр В. Божко² bozhkosizran@mail.ru 0000-0001-7822-1952

Татьяна П. Новикова², novikova_tp.vglta@mail.ru 0000-0003-1279-3960

Сергей В. Ребко³, rebko@belstu.by 0000-0002-6892-2859

¹ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Исследование может оказать поддержку в принятии решений лесозаготовителям и участникам лесных отношений, обязанным осуществлять лесовосстановительные мероприятия, для оценки факторов, изменяющих эффективность лесохозяйственных и лесозаготовительных операций. Сбалансированность производственного и экологического эффектов от применения лесотранспортных машин при разработке лесосеки является важной ступенью эффективного управления качеством восстановления лесных ландшафтов. Степень уплотнения лесной почвы от воздействия движителей напрямую влияет как на расход топлива энергетической установкой лесотранспортной машины, так и на способность лесных семян главной породы к прорастанию. Первичная транспортировка деревьев и их частей (хлыстов, балансов, сортиментов, порубочных остатков и прочих отходов лесозаготовительного производства) занимает всё больший объем в энергобалансе лесотранспортной машины. Необходимо решать комплексные задачи по выбору для выполнения транспортной работы в условиях лесосеки энергоэффективных и маневренных двухосных сочлененных лесотранспортных машин в сравнении с машинами с неразрезной рамой. Для максимального удовлетворения требований к эффективной эксплуатации машин в сложных условиях лесосеки необходимо обеспечить, наряду с высокими эксплуатационными свойствами (тяговыми показателями, проходимостью, маневренностью, плавностью хода), высокий уровень технико-экономических показателей. Оценка применимости существующих конструкций лесотранспортных машин осуществлялась статистическими методами Уорда и межгрупповых связей по критериям уплотнения почвы, проходимости, маневрирования, циркуляции мощности, тяговых потерь, сбалансированности развесовки и целевого назначения. При планировании будущих исследований необходимо ответить на ряд вопросов: какой критерий использовать в качестве универсального для однозначного выбора типа лесотранспортной машины? Можно ли заранее с применением беспилотных авиационных систем оценить геоморфологию будущей лесосеки и спрогнозировать эффективные траектории перемещения сочлененных лесотранспортных машин?

Ключевые слова: лесосека, лесовосстановление, транспортное освоение лесов, сочлененная рама, циркуляция мощности, потери мощности.

Благодарности: авторы статьи благодарят доктора технических наук, профессора Кочнева Александра Михайловича за ценные замечания при подготовке научного материала для данной статьи. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Двухосные сочлененные лесотранспортные машины в условиях лесосеки: оценка применимости / В. В. Гудков, П. А. Сокол, А. В. Божко, Т. П. Новикова, С. В. Ребко // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 77–95. – Библиогр.: с. 88–95 (52 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>.

Поступила 11.05.2022. Пересмотрена 17.12.2022. Принята 18.12.2022. Опубликована онлайн 26.12.2022.

Review

BIAXIAL ARTICULATED TIMBER VEHICLES IN THE CONDITIONS OF A FELLING: ASSESSMENT OF APPLICABILITY

Viktor V. Gudkov¹, gydvik-51@yandex.ru  0000-0002-4691-7047

Pavel A. Sokol¹, pavsokol@yandex.ru  0000-0001-6090-7008

Alexandr V. Bozhko² , bozhkosizran@mail.ru  0000-0001-7822-1952

Tatyana P. Novikova², novikova_tp.vglta@mail.ru  0000-0003-1279-3960

Siarhei U. Rabko³, rebko@belstu.by  0000-0002-6892-2859

¹*Military Education Air Force Education and Research Center N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation, Starykh Bolshevikov, 54a, Voronezh, 394064, Russian Federation*

²*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087, Russian Federation*

³*Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus*

Abstract

The study can provide decision-making support to loggers and participants in forest relations who are obliged to carry out reforestation activities to assess the factors that change the effectiveness of forestry and logging operations. The balance of production and environmental effects from the use of forest transport machines in the development of forestry is an important step in effective quality management of forest landscape restoration. The degree of compaction of the forest soil from the impact of propellers directly affects both the fuel consumption of the power plant of the forest transport machine and the ability of forest seeds of the main breed to germinate. The primary transportation of trees and their parts (whips, balances, assortments, waste residues and other waste of logging production) occupies an increasing volume in the energy balance of the timber transport machine. It is necessary to solve complex problems of choosing energy-efficient and maneuverable biaxial articulated timber transport vehicles in comparison with machines with a continuous frame for performing transport work in the conditions of a cutting area. In order to maximize the requirements for the efficient operation of machines in difficult cutting conditions, it is necessary to ensure, along with high operational properties (traction, cross-country ability, maneuverability, smooth running), a high level of technical and economic indicators. The assessment of the applicability of existing structures of forest transport vehicles was carried out by statistical methods of Ward and intergroup relations according to the criteria of soil compaction, patency, maneuvering, power circulation, traction losses, balance of weight distribution and purpose. When planning future research, it is necessary to answer a number of questions: which criterion should be used as a universal one for unambiguous selection of the type of forest transport vehicle? Is it possible to estimate the geomorphology of the future cutting area in advance with the use of unmanned aircraft systems and predict the effective trajectories of movement of articulated timber vehicles?

Keywords: *logging, reforestation, forests transport development of, articulated frame, power circulation, power loss.*

Acknowledgments: The authors thank professor Alexander M. Kochnev for the advice provided in the preparation of scientific material for this paper. The authors thank the reviewers of their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: Gudkov V.V., Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rabko S.U. (2022). Biaxial articulated timber vehicles in the conditions of a cutting: assessment of applicability. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 77-95 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>.

Received 11.05.2022. Revised 17.12.2022. Accepted 18.12.2022. Published online 26.12.2022.

Введение

Лесовосстановление – спонтанное [1] или искусственное [2] – при лесоземлепользовании зависит от наличия источников семян (способов оставления деревьев на лесосеке для естественного лесовосстановления [3]; подготовки [4] и тестирования семян [5,6] для искусственного лесовосстановления) и лесорастительных условий: изменения физико-химических свойств верхнего слоя почв [7,10], её уплотнения [8,9] двигателями форвардеров [11,12,13,14], а также дифферент климатических условий [15, с. 36] в сторону потепления. Для рационального управления поддержкой жизненного цикла [16,17] лесотранспортных машин (ЛТМ) основные усилия прилагаются к обеспечению оптимального баланса между производственным (транспортный цикл [18,19] и адаптация расхода топлива [20]) и экологическим эффектами при их проектировании и использовании.

Производственный эффект от использования ЛТМ обусловлен улучшением маневренности, тягово-скоростных свойств и топливной экономичности. При движении ЛТМ по криволинейной траектории в условиях лесосеки энергетическая установка расходует большее количество топлива, чем по прямолинейным [20], что предопределяет нахождение оптимального сочетания между маневренностью, полной массой и перераспределением потока мощности в трансмиссии ЛТМ.

Экологический эффект обусловлен адаптацией конструктивно-технологической схемы ЛТМ к снижению уплотняющего воздействия на лесную почву [21,22,23], особенно с низкой насыпной плотностью и высокой объемной влажностью [24], занимающую более 60 % территории лесного фон-

да Российской Федерации [25]. Лесная подстилка может в значительной степени препятствовать уплотнению почвы форвардерами [26]. Повышение параметров проходимости конструктивно может быть достигнуто проектированием дополнительной гидравлически поднимающейся оси [11] на основе концепции HSM [14], проектированием гусеничных движителей [12] на основе концепции OnTrack и других [13]. Меры, указанные выше для увеличения проходимости ЛТМ, не в полной мере обеспечивают удовлетворительных результатов на слабых, переувлажненных грунтах. Наличие многоколесной схемы не обеспечивает многократное движение форвардера по одному и тому же следу из-за значительного по глубине колееобразования [25], приводящего к уплотнению и разрушению лесной почвы в условиях лесосеки. Известно, что стрессор уплотнения почвы значимо ($p < 0,05$) влияет на снижение прироста по диаметру хвойных деревьев [27]. Попытка повышения проходимости путем увеличения количества ведущих мостов колесных ЛТМ приведет к повышению металлоемкости и усложнению схемы трансмиссии, увеличению стоимости ЛТМ [25].

В условиях создавшейся геополитической обстановки необходимо решать комплексные задачи по ускоренному техническому перевооружению парка лесного комплекса, применяя энергоэффективные [28,29] и маневренные двухосные сочлененные лесотранспортные машины (ДСЛТМ) с низким удельным давлением на почву для выполнения работ по первичной транспортировке деревьев [30]. Транспортировка деревьев и их частей (хлыстов, балансов, сортиментов, порубочных остатков и др.) занимает всё больший объем в энер-

гобалансе при работе лесотранспортной машины, что предусматривает обязательный учет показателя средней транспортной скорости при проектировании для работы в условиях лесосеки. Для максимального удовлетворения требований к эффективной эксплуатации ЛТМ в сложных условиях лесосеки необходимо обеспечить, наряду с высокими эксплуатационными свойствами [31] (тяговыми показателями [32], проходимостью [33], маневренностью [34], плавностью хода [35, 36], высокий уровень технико-экономических показателей: производительности и топливной экономичности [37].

Одним из важнейших параметров ДСЛТМ является высокая способность к маневрированию, что незаменимо при движении на крутых поворотах и разворотах [38], при движении в стесненных условиях между препятствиями, например, по извилистой лесной дороге или среди деревьев. Это могут быть деревья, оставленные для естественного лесовозобновления главной породы, – контурные или внутрилесосечные обсеменители. Причем маневрирование ДСЛТМ будет зависеть от способа оставления таких деревьев на лесосеке [3]. Как правило, оставляют отдельно стоящие деревья селекционных форм с улучшенными наследственными свойствами [39] и ветроустойчивостью, перекрывающие налетом семян достаточно широкую площадь лесосеки (например, сосну обыкновенную). Либо оставляют семенные группы деревьев (лиственница) для лучшей опыляемости и устойчивости к ветровой нагрузке, с расстоянием между группами не более 50 метров. Более того, если ДСЛТМ осуществляет транспортировку хлыстов, сортиментов или балансов, имеющих габаритную специфику, то способность интенсивно маневрировать становится ключевой.

Оценка применимости каждой модели ДСЛТМ в условиях лесосеки связана со сложностью и разнообразием эксплуатационных условий и набором выполняемых технологических операций [40]. Эффективная работа и производительность ЛТМ может определяться как в виде самостоятельной единицы, так и в виде части в многоступенчатом технологическом процессе.

Цель данного исследования – оценить степень применимости в условиях лесосеки ДСЛТМ

по критериям циркуляционной мощности, тяговых потерь и маневрирования с учетом технико-технологических параметров, конструктивных особенностей и целевого назначения, а также определить наличие или отсутствие кластеризации применяемых в настоящее время конструкций.

Материалы и методы

Предмет исследования

Колесные лесотранспортные машины, имеющие различные конструкции сочленения рамы, различные степени возникновения циркулирования мощности между бортами, различную степень маневрирования, различный порог тяговых потерь, различное целевое назначение.

Сбор данных

Формировали запрос на поисковой платформе Scopus в соответствии с термом: TITLE-ABS-KEY (articulated W/2 (vehicle OR machine OR frame OR forwarder OR truck) AND (forest* OR felling OR cutting)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012)). Для охвата отечественного сегмента сочлененных ЛТМ формировали соответствующий запрос в системе ELibrary.

Отбирали наиболее релевантные публикации, из которых для каждой модели сочлененной машины формировали в сводной таблице строку с оценочными (номинативными) переменными по следующим критериям:

CRT1 – степень вероятного уплотнения почвы движителями в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT2 – степень проходимости в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT3 – степень маневрирования в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT4 – вероятность возникновения эффекта циркулирования мощности в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT5 – вероятность тяговых потерь в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая)

CRT6 – степень сбаласированности развесовки по осям в снаряженном состоянии без груза (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT7 – целевое назначение (1 – трелевка хлыстов; 2 – вывоз сортиментов; 3 – вывоз отходов лесозаготовки).

Выбор критериев осуществляли исходя из обеспечения необходимых условий как для последующего лесовосстановления, так и для эффективной эксплуатации ЛТМ.

В последней строке матрицы для сравнения привели форвардерный блок, состоящий из колесного трактора и прицепа [18].

Далее для оценки существующих конструкций ДСЛТМ по рабочим режимам и параметрам при рабо-

те в условиях лесосеки комплектовали сводные таблицы для основных и вспомогательных ЛТМ.

Анализ данных

Кластеризацию применимости ЛТМ осуществляли как по вариантам исполнения лесотранспортных машин, так и по критериям с использованием иерархического анализа методами Уорда [40], оценивающего удаленность номинативных переменных от центра кластера на основании меры квадрата Эвклидова расстояния с помощью пакета прикладных программ IBM SPSS Statistics v25. Визуализацию осуществляли с помощью кластерной диаграммы сходства и различия.

Результаты

Результаты анализа возможной применимости колесных сочлененных ЛТМ представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

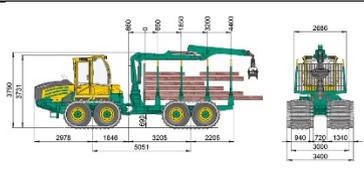
Анализ применимости сочлененных лесотранспортных машин в условиях лесосеки

Table 1

Analysis of the applicability of articulated timber vehicles in the conditions of a cutting area

Общий вид ЛТМ FTV image	Источник Reference	Тип ЛТМ FTV type	CRT 1	CRT 2	CRT 3	CRT 4	CRT 5	CRT 6	CRT 7
	Sennikov M.A., Bachin O.I. Tractors, skidding machines and aggregates. ASTU, Arkhangelsk – 2002 – 122 p.	T-40AJ T-40AL	3	1	3	2	2	1	1
	Technical description and operating instructions K-703MA. SJR «Petersburg Tractor Plant», JSC «Kirov Plant». St. Petersburg – 2016. – 65 p	МЛ-56-АТ	2	2	3	2	2	2	1
	https://product-line.amkodor.by/en/amkodor-2641-en/	AMCODOR 2641	2	2	2	2	2	3	1
	Sennikov M.A., Bachin O.I. Tractors, skidding machines and aggregates. ASTU, Arkhangelsk – 2002 – 122 p.	ЛТ-171 ЛТ-171А ЛТ-171 ЛТ-171А	2	2	2	2	2	1	1

Технологии. Машины и оборудование

Общий вид ЛТМ FTV image	Источник Reference	Тип ЛТМ FTV type	CRT 1	CRT 2	CRT 3	CRT 4	CRT 5	CRT 6	CRT 7
	Sennikov M.A., Bachin O.I. Tractors, skidding machines and aggregates. ASTU, Arkhangelsk – 2002 – 122 p.	ЛТ-157 LT-157	2	2	2	2	2	1	1
	Sennikov M.A., Bachin O.I. Tractors, skidding machines and aggregates. ASTU, Arkhangelsk – 2002 – 122 p.	МЛ-30 ML-30	2	2	2	2	2	1	1
	[14] https://forestmachinemagazine.com/what-happened-to-the-forwarder-2020-project/	Forwarder 2020	1	3	1	3	3	3	2
	[14] https://hsm-forest.net/hsm-208f-bigfoot-en.html	HSM 208F	1	3	1	3	3	3	2
	[20] https://www.ponsse.com/ponsse-buffalo	Ponsse Buffalo KOPA	1	3	1	3	2	3	2
	[19] https://www.mechanization.ru/equipment/forwarders/john_deere_1210e/	John Deere 1210E	1	3	1	3	2	3	2
	[18]	Ursus C-360 + Farma T6	3	1	1	1	3	2	3

Источник: собственные результаты авторов и источники, указанные в столбце 2.

Source: author's results, and the sources listed in column 2.

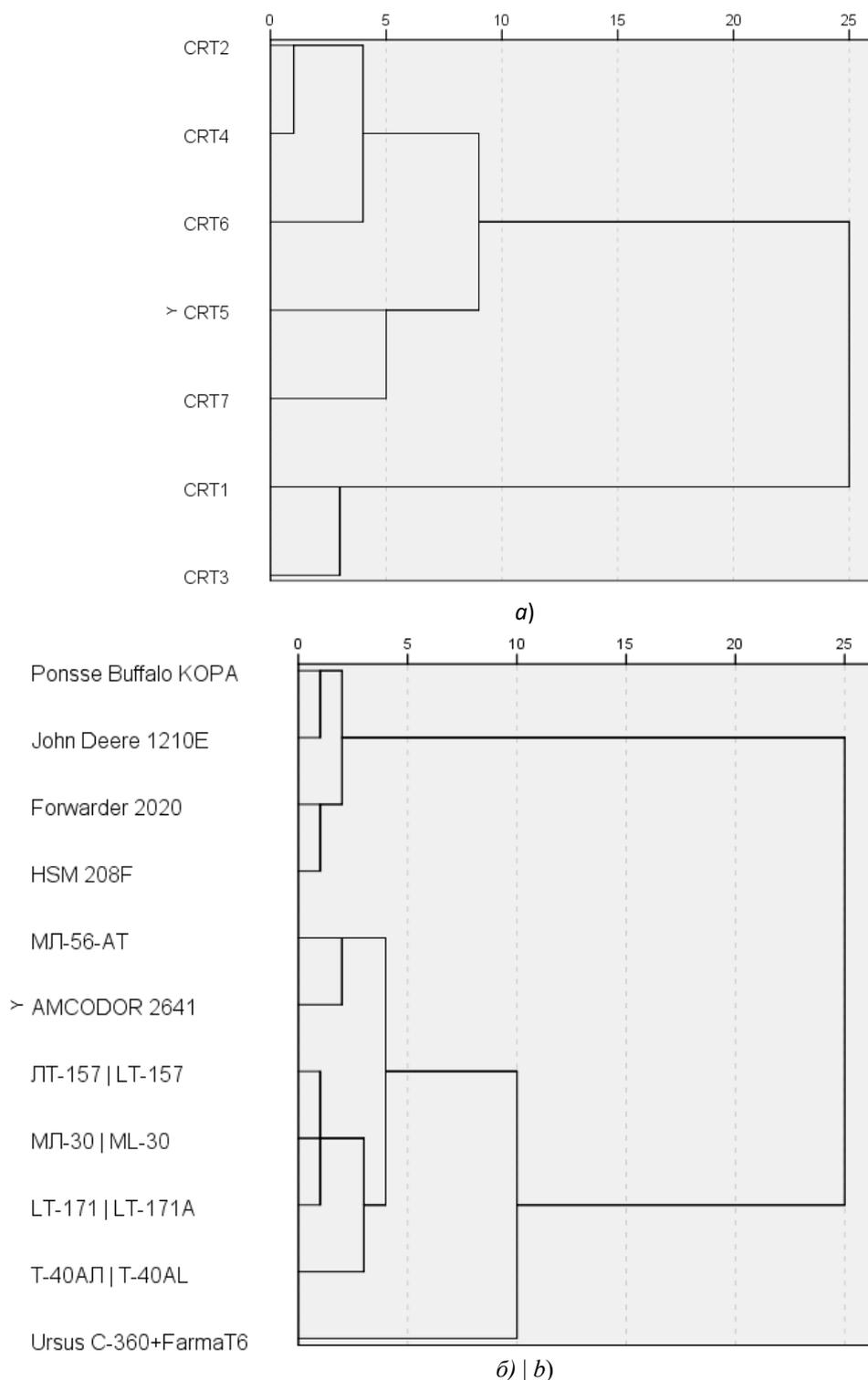


Рис. 1. Иерархическая кластеризация применимости колесных сочлененных ЛТМ по критериям классификации (а) и типам ЛТМ (б)
 Figure 1. Hierarchical clustering of applicability of wheeled articulated FTVs according to classification criteria (a) and types of FTVs (b)

Источник: собственные результаты авторов
 Source: ownresults

Результаты объективного анализа конструкций отечественных ДСЛТМ представлены в табл. 2 и на рис. 2, а в табл. 3 и на рис. 3 – сравнение вспомогательных машин. Конструкции двухосных сочлененных ЛТМ оценивались по критериям затрат в процессе эксплуатации на всех этапах жизненного цикла, с возможностью применения унифицированных сборных единиц и агрегатов. Дана оценка технологичности конструкции, способствующей получению высоких эксплуатационных характеристик и показателей эффективности применения.

Таблица 2
Основные параметры шарнирно-сочлененных машин

Table 2
Main parameters of articulated machines

Мо- дель ЛТМ FTV model	Мощ- ность двигате- ля, кВт Engine power, kW	Рабочая ско- рость, км/ч Operati- ng speed, km/h	Объем- пачки, м ³ Packet volume, m ³	Производитель- ность (хлыст 0,5 м ³), м ³ /ч Capacity (0.5 m ³ long log), m ³ /h
Трелевочные тракторы Skidders				
ЛТ-157 LT-157	110	5,0 – 7,0	3,0 – 5,0	21,2
ЛТ-171 LT-171	110	5,0 – 7,0	6	28,6
ЛТ-171А LT-171А	121,4	5,0 – 7,0	6	35,6
МЛ-30 ML-30	158	5,0 – 7,0	6,5	37,5

Источник: собственные результаты авторов
Source: author's results

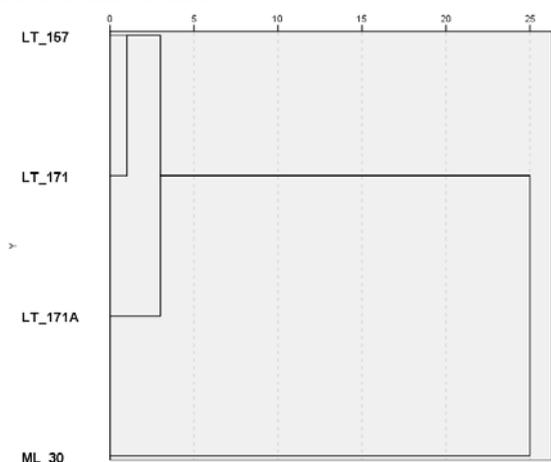


Рис. 2. Иерархическая диаграмма сходства и различия ДСЛТМ

Figure 2. Hierarchical diagram of similarity and difference of articulated machines

Источник: собственные результаты авторов
Source: author's results

Таблица 3

Основные параметры вспомогательных
лесотранспортных машин

Table 3

Main parameters of auxiliary timber transport vehicles

Модель ЛТМ FTV model	Мощность двигателя, кВт Engine power, kW	Рабочая ско- рость, км/ч Operatin- g speed, km/h	Объ- ем- пачки , м ³ Packet vol- ume, m ³	Грузо- подъем- ность, т Load capacity, t
Сортиментовозы Vehicle for transport of assortments				
МЛ – 33	110	5,49	15	10
МЛ – 34	110	3,5	9,2	10
Погрузочно-транспортная машины для перевозки отходов Loading-transport machines for felling waste transportation				
ПЛ – 16А	110	2,4 - 31,6	17	4,5
ЛТ – 175	110	до 31,6	25	8

Источник: собственные результаты авторов
Source: author's results

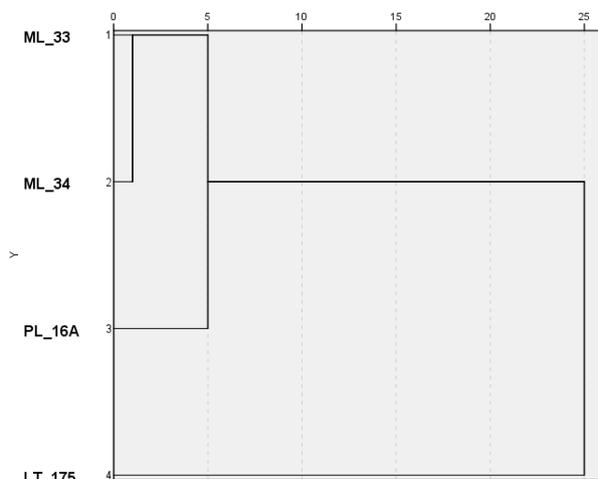


Рис. 3. Иерархическая диаграмма сходства и различия вспомогательных ДСЛТМ
Figure 3. Hierarchical diagram of similarity and difference of auxiliary transport vehicles

Источник: собственные результаты авторов
Source: author's results

Обсуждение

Наилучшими возможностями для маневрирования обладают ЛТМ, построенные на базе со-

членной рамы (СР), которая в общем случае бывает двух типов: рычажного (рис. 4) и шарнирного (рис. 5).

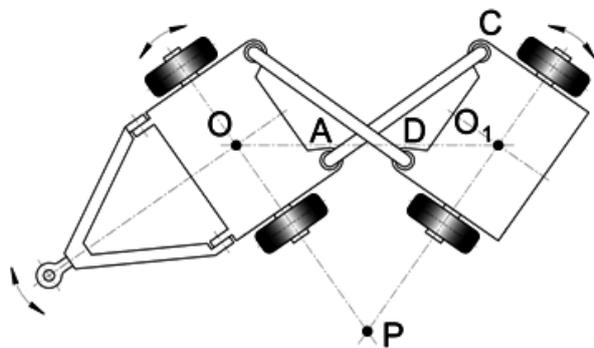


Рис. 4. Рама ЛТМ рычажно-сочлененного типа

Figure 4. Lever-articulated platform

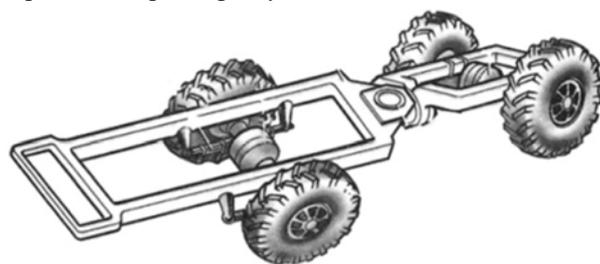
Источник: <https://naukatehnika.com/teleshka-s-shirokimi-vozmozhnostyami-kolesnaya-platforma.html>
Source: <https://naukatehnika.com/teleshka-s-shirokimi-vozmozhnostyami-kolesnaya-platforma.html>

Каждая из этих конструкций имеет общие и специфические достоинства и недостатки, которые и определяют их распространение в эксплуатационном применении. Так, рычажная система задает точную траекторию движения полурам или платформ относительно друг друга. Основным же недостатком является ограниченный угол поворота и практически невозможный перекосяк полурам относительно друг друга.

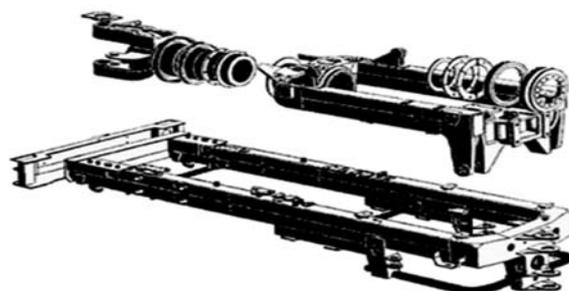
Шарнирно-сочлененные рамы (ШСР) допускают конструктивное складывание до 60° и взаимный перекосяк до $\pm 30^\circ$. Складывание в вертикальной плоскости в эксплуатации востребуется редко. Именно эти особенности и определили более широкое распространение ШСР в конструкциях лесотранспортных машин.

В общем случае, ШСР дает спектр преимуществ, основными из которых являются «уменьшенный радиус поворота и разворота, возможность движения всех ведущих колес машины по одному следу [41]». Узел сочленения полурам в кинематическом центре [42] ДСЛТМ конструктивно определяется двумя шарнирами – вертикальным и горизонтальным. Возможность перемещения друг относительно друга с двумя степенями свободы значительно разгружает полурамы от скручивания, увеличивая возможность сцепления движущихся

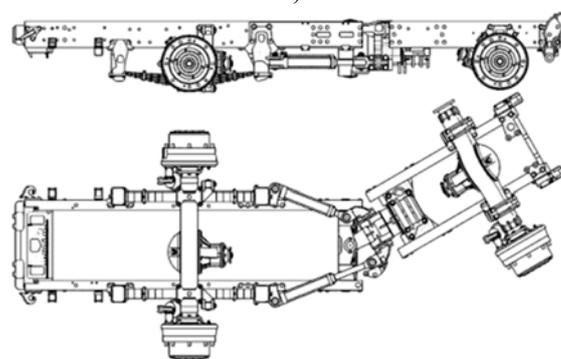
след в след ведущих колес с опорной поверхностью лесной почвы, позволяет эффективнее использовать сцепной вес машины, повышает проходимость, маневренность и почти полностью исключает вывешивание одного из колес при преодолении неровностей рельефа в условиях лесосеки.



а)



б)



в)

Рис. 5. Общий вид шасси (а) шарнирно-сочлененной ЛТМ и полурам базовых моделей К-701 (б) и Т-150К (в)

Figure 5. Chassis (a) of the articulated timber machine

and the half-frames of based models К-701 (b), and

Источники: Родичев В.А. Тракторы. М.: Академия, 2015. Тракторы «Кировец» К-701, К-700А М.: Тракторэкспорт, 1986.

Трактор ХТЗ-Т-150К. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ХТЗ, Харьков, 1983.

Sources: Rodichev V.A. Tractors. M.: Academy, 2015. 287p. Tractors «Kirovets», K-701, K-700A M: Tractor export, 1986

HTZ-T-150K tractor. Technical description and operating instructions HTZ, Kharkiv, 1983.

Трансмиссия двухосной сочлененной лесотранспортной машины – полноприводная, передача крутящего момента на задние относительно шарнирного сочленения колёса осуществляется постоянно или подключается по мере загрузки, «двигатель выносится вперед, за переднюю ось, что улучшает развесовку (распределение массы) [41]». При этом необходимо следить за загрузкой задней оси [43], например, технологическим оборудованием для трелевки. Компонентная схема ДСЛТМ должна обеспечивать «распределение массы 70 на 30 % соответственно, на ведущие колеса переднего и заднего мостов [42, с. 12]» в снаряженном состоянии.

Конструктивно, при наличии межосевого дифференциала, циркуляция мощности по ведущим осям правого и левого бортов отсутствует даже при повороте, однако, при разных радиусах качения ведущих колес по мостам явление циркуляции мощности возникает между передней и задней ведущими осями [36, 44].

Отличительной особенностью колесных ДСЛТМ является наличие заблокированного привода ведущих колес, однако это способствует возникновению «паразитной» мощности (50-60 % номинальной мощности энергетической установки ЛТМ), циркулирующей в трансмиссии, «в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность [45]», приводя к дополнительному расходу топлива и вызывая преждевременный износ шин при повышенных нагрузках [36].

Характерными примерами, разработанными в РФ, являются машины МЛ-30 и МЛ-56 на базе тракторов К-703 и К-703М, они представляют собой модификации сельскохозяйственных тракторов К-700 и К-701М, приспособленные для работы в условиях лесосек. Ранее лесной комплекс был укрупнен ЛТМ Онежского и Алтайского транспортных заводов.

При проведении анализа конструкций колесных ДСЛТМ было выявлено, что ШСР могут быть выполнены: с шарниром, обеспечивающим поворот вокруг поперечной горизонтальной оси, с шарниром с несколькими степенями свободы [48] либо с силовыми гидравлическими цилиндрами, обеспечивающими поворот полурам [46].

Большинство известных конструкций ДСЛТМ обладают тяговыми показателями, позволяющими эффективно выполнять технологические операции при первичной транспортировке деревьев, однако из-за несоответствия параметров традиционной механической заблокированной трансмиссии происходит процесс буксования ведущих колес, что не обеспечивает стабильность хода по лесосеке, а ходовая часть подвергается существенным перегрузкам.

Достоинства и недостатки ШСР ДСЛТМ достаточно подробно представлены в работе [41]. Они относятся как к показателям надежности, так и к показателям устойчивости и грузоподъемности. Колея в условиях лесосеки может иметь достаточно существенный перепад высот между следами как в продольном, так и в поперечном направлениях, что вызывает кинематическое рассогласование ведущих колес, приводящее к потерям тяговой мощности и нагрузке в узлах сочленения полурам [41].

Ограничения по мощности привели к ситуации, когда колесные ДСЛТМ в Российской Федерации ограничено распространены, и их, в основном, производят на шасси тракторов 4К4, а также с использованием различных узлов и агрегатов от машин другого назначения (МЛ-56-АТ, ЛТ-171А и др., см. табл. 1), что требует учета конструктива машин при применении в условиях низких температур [47].

Подобная конструкция применялась на опытном образце сортиментовоза, использующего базу трактора МТЗ-80 [41] (рис. 6). Впоследствии была создана погрузочно-транспортная машина МЛПТ-354 (рис. 7).

Необходимость в машинах высокой единичной производительности выдвигает требование об увеличении их энергетических возможностей. Однако если в плане использования двигателей высокой мощности в современных условиях проблем практически нет, то реализация этой мощности в условиях слабонесущих поверхностей лесосек и сложностью с маневрированием предъявляет высокие требования к несущей конструкции машины и его ходовому оборудованию. Использование многоосных машин со всеми ведущими осями создает условия для неодинаковых условий качения колес и

осей, перераспределению нагрузок (сил и моментов) между ними и, соответственно, появлению циркуляции мощности. Учитывая сложность микрорельефа лесных дорог это явление становится определяющим ограничительным фактором в задаче создания машин высокой производительности и при создании многоосных машин.



Рис. 6. Опытный образец на базе трактора МТЗ-80

Figure 6. Prototype on tractor's base MTZ-80

Источник: Сенников М.А., Бачин О.И. Тракторы, трелевочные машины и агрегаты. АГТУ, Архангельск – 2002. – 122 с.

Source: Sennikov M.A., Bachin O.I. Tractors, skidding machines and aggregates. ASTU, Arkhangelsk – 2002. – 122 p.

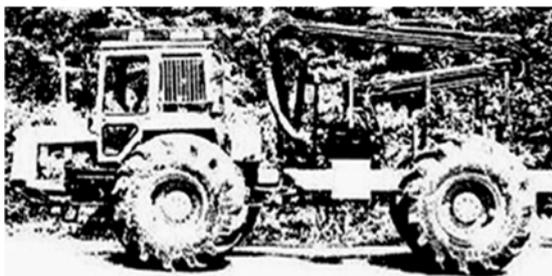


Рис. 7. Общий вид МЛТП-354

Figure 7. General view MLTP-354

Источник: Сенников М.А., Бачин О.И. Тракторы, трелевочные машины и агрегаты. АГТУ, Архангельск, 2002. 122 с.

Source: Sennikov M.A., Bachin O.I. Tractors, skidding machines and aggregates. ASTU, Arkhangelsk – 2002. – 122 p.

В целях повышения тяговых показателей ДСЛТМ, может быть использовано новое устройство передачи крутящего момента к ведущим мостам (рис. 8) [49, 50].

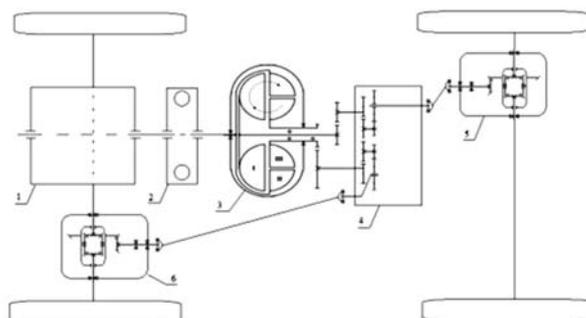


Рис. 8. Гидродинамическая передача раздельного привода ведущих мостов ДСЛТМ: 1 – двигатель; 2 – повышающий редуктор; 3 – гидротрансмиссия; 4 – коробка передач; 5 – задний мост; 6 – передний мост

Figure 8. Hydrodynamic transmission of the separate drive of the drive axles: 1 – engine; 2 – step-up gearbox; 3 – hydraulic transmission; 4 – transmission; 5 – rear axle; 6 – front axle

Источник: собственная композиция авторов.

Source: result of the authors' composition.

Выбор энергетической установки из условия максимального чередования нагрузочных режимов в трансмиссии, совершенствование конструкции рам и разработка перспективных трансмиссий колесных ДСЛТМ является важной и актуальной задачей и потребует в будущем проведения научно обоснованных расчетов и опытно-конструкторских работ. Например, использования сверточной нейронной сети для прогнозирования показателей проходимости колесных сочлененных ЛТМ на основе локальной карты высот и целевой скорости [51], с использованием цифровой модели <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0022489822000313-mmc4.mp4>, движущейся по цифровой опорной поверхности <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0022489822000313-mmc3.mp4>.

Заключение

Выбор при распределении транспортных работ на лесосеке в сторону двухосных сочлененных лесотранспортных машин целесообразно осуществлять в случае:

- санитарных или выборочных рубок с выделением деревьев-обсеменителей [3];
- плантационного лесовыращивания с применением концепции микро-форвардера [52].

Список литературы

1. Martínez-Baroja, L. Drivers of oak establishment in Mediterranean old fields from 25-year-old woodland islets planted to assist natural regeneration / L. Martínez-Baroja, J.M. Rey-Benayas, L. Pérez-Camacho, P. Villar-Salvador // *European Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 141. – No. 1. – P. 17-30. – URL: <http://doi.org/10.1007/s10342-021-01423-7>.
2. Rodríguez, S.M. Conifer biotechnology: an overview / S.M. Rodríguez, R.J. Ordás, J.M. Alvarez // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 7. – P. 1061. – URL: <http://doi.org/10.3390/f13071061>.
3. Беляева, Н. В. Оценка эффективности оставления семенных деревьев на вырубках в различных типах леса / Н. В. Беляева, Н. С. Сорокина, Д. А. Данилов // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2022. – № 61. – С. 6-12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48442043>.
4. Свиридов, Л. Т. Исторический аспект проблемы сортирования лесных семян / Л. Т. Свиридов, А. И. Новиков // *Лес в жизни восточных славян от Киевской Руси до наших дней : Сборник научных трудов / Ответственный редактор: Багинский В. Ф.; Институт леса Национальной академии наук Беларуси*. – Гомель : Институт леса Национальной академии наук Беларуси, 2003. – С. 186-190. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23415453>.
5. Новиков, А. И. Исследование спектрометрических параметров семенной кожуры сосны обыкновенной в ИК-диапазоне / А. И. Новиков, В. В. Саушкин // *Лесотехнический журнал*. – 2018. – Т. 8. – № 3(31). – С. 6-15. – Режим доступа: http://doi.org/10.12737/article_5b97a164e41782.20107217.
6. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, V. A. Zelikov [et al.] // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – No 12. – P. 1064. – URL: <http://doi.org/10.3390/F10121064>.
7. Ilintsev A., Nakvasina E., Aleynikov A., Tretyakov S., Koptev S., Bogdanov A. Middle-term changes in topsoils properties on skidding trails and cutting strips after long-gradual cutting: a case study in the boreal forest of the North-East of Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2018. – Vol. 39. – No 1. – P. 71-83. – URL: <https://crojfe.com/site/assets/files/4189/ilintsev.pdf>.
8. Kormanek, M. Use of impact penetrometer to determine changes in soil compactness after Entracon Sioux EH30 timber harvesting / M. Kormanek // *Croatian journal of forest engineering*. – 2022. – Vol. 43. – № 2. – P. 325-337. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>.
9. Kormanek, M. Ground pressure changes caused by MHT 8002HV crawler harvester chassis / M. Kormanek, J. Dvořák // *Croatian journal of forest engineering*. – 2021. – Vol. 42. – № 2. – P. 201-211. – Режим доступа: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.844>.
10. Mederski, P.S. Challenges in forestry and forest engineering / P.S. Mederski, S.A. Borz, A. Đuka, A. Lazdiņš // *Croatian journal of forest engineering*. – 2021. – Vol. 42. – № 1. – P. 117-134. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.838>.
11. Fjeld, D. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development – a Norwegian field study / D. Fjeld, Ø. Østby-Berntsen // *International Journal of Forest Engineering*. – 2020. – Vol. 31. – № 3. – P. 192-196. URL: <http://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.
12. Engler, B. Rubber tracked bogie-axles with supportive rollers – a new undercarriage concept for log extraction on sensitive soils / B. Engler, S. Hoffmann, M. Zscheile // *International Journal of Forest Engineering*. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – P. 43-56. URL: <http://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.
13. Gelin, O. Concept evaluations of three novel forwarders for gentler forest operations / O. Gelin, R. Björheden // *Journal of Terramechanics*. – 2020. – Vol. 90. – P. 49-57. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.04.002>.
14. Starke, M. Rut depth evaluation of a triple-bogie system for forwarders—field trials with tls data support / M. Starke, C. Derron, F. Heubaum, M. Ziesak // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – № 16. – P. 6412. – URL: <http://doi.org/10.3390/su12166412>.
15. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты

/ А. И. Новиков, М. В. Драпалюк, С. В. Соколов, Т. П. Новикова. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – 176 с. – ISBN 978-5-7994-0976-0. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>.

16. Беляева, Т. П. Управление предприятием на основе современных ИПИ-технологий / Т. П. Беляева // Моделирование систем и процессов. – 2010. – № 1-2. – С. 13-18. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16519690>.

17. Беляева, Т. П. Интегрированная среда управления производственными процессами на основе ИПИ-технологий / Т. П. Беляева // Моделирование систем и процессов. – 2010. – № 1-2. – С. 18-23. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16519691>.

18. Kulak, D. Productivity and working time structure of timber forwarding in flatland thinned pine stand with the use of farm tractors / D. Kulak, G. Szewczyk, A. Stańczykiewicz // Croatian journal of forest engineering. – 2023. – Vol. 44. – № 1. – P. 1-11. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1656>.

19. Danilovic, M. Transport of technical roundwood by forwarder and tractor assembly from poplar plantations / M. Danilovic, D. Stojnic, S. Karic, M. Sucevic // Nova Mehanizacija Sumarstva. – 2014. – Vol. 35. – P. 11-22. – URL: <https://hrcak.srce.hr/clanak/180244>.

20. Prinz, R. Soil, driving speed and driving intensity affect fuel consumption of forwarders / R. Prinz, B. Mola-Yudego, J. Ala-Ilomäki et al. // Croatian journal of forest engineering. – 2023. – Vol. 44. – № 1. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1725>.

21. Мисуно, Ю. И. Методика экспериментальных исследований по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами / Ю. И. Мисуно // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2021. – № 1(240). – С. 132-140. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44694937>.

22. Взаимодействие колесного движителя ходовых систем с грунтовым основанием / Ю. А. Ким, М. Т. Насковец, Н. И. Жарков, В. И. Гиль // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 1(228). – С. 143-149. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42400232>.

23. Исследование процесса взаимодействия колесного движителя с двухслойным грунтовым основанием / Ю. А. Ким, М. Т. Насковец, Н. И. Жарков, В. И. Гиль // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2021. – № 2(246). – С. 208-211. – Режим доступа: <http://doi.org/10.52065/2519-402X-2021-246-26-208-211>.

24. Suzuki, L.E.A.S. Prevention of additional compaction in eucalyptus and pasture land uses, considering soil moisture and bulk density / L.E.A.S. Suzuki, D.J. Reinert, P.T. Fenner et al. // Journal of South American Earth Sciences. – 2022. – Vol. 120. – P. 104113. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104113>.

25. Григорьев, И.В. Достоинства и недостатки колесной и гусеничной баз лесопромышленных тракторов / И.В. Григорьев, А.И. Никифорова, В.Ю. Лисов // Леспромформ. – 2014. – №4 (102). – Режим доступа: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3705> (дата обращения: 14.11.2022).

26. Labelle, E.R. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance / E.R. Labelle, B.J. Poltorak, D. Jaeger // Canadian Journal of Forest Research. – 2019. – Vol. 49. – № 2. – P. 164-178. – URL: <http://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0324>.

27. Blouin, V.M. Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth / V.M. Blouin, M.G. Schmidt, C.E. Bulmer, M. Krzic // Forest Ecology and Management. – 2008. – Vol. 255. – № 7. – P. 2444-2452. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.008>.

28. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания / А. И. Новиков, С. В. Дорохин, Т. П. Новикова, А. Г. Каширских // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования : сборник научных трудов по материалам Меж-

дународной научно-практической конференции, Воронеж, 20–21 марта 2014 года / под общей редакцией А.И. Новикова. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2014. – С. 272-274. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21906770>.

29. Новиков, А. И. Опыт применения альтернативных источников энергии в транспортно-технологическом комплексе / А. И. Новиков // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2014. – Т. 1. – № 1(1). – С. 62-65. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23015125>.

30. Силаев, Г.В. Тракторы в лесном хозяйстве / Г.В. Силаев, Н.Д. Баздырев. – М.: Юрайт, 2019. – 340 с.

31. Кочнев, А.М. Повышение эксплуатационных свойств колесных трелевочных тракторов путем обоснования их основных параметров : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.21.01 / Санкт-Петербургская лесотехн. академия. - Санкт-Петербург, 1995. - 36 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000087485>.

32. Гудков, В. В. Влияние трелемой пачки древесины на тяговые показатели сочлененных лесотранспортных машин / В. В. Гудков, П. А. Сокол, А. В. Божко // Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства : Научно-практическая конференция, Воронеж, 21–22 октября 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 136-138. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47454050>.

33. Волосунов, М.В. Обоснование способа и механизма поворота колёсно-гусеничной лесотранспортной машины : диссертация ... кандидата технических наук : 05.21.01 / Волосунов Михаил Владимирович; [Место защиты: Поволж. гос. технол. ун-т]. - Ухта, 2014. - 160 с.

34. Као Хюи Жап. Обоснование параметров механизма складывания колесных лесных тракторов с целью повышения их маневренности : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.21.01 / Као Хюи Жап; [Место защиты: С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С.М. Кирова]. - Санкт-Петербург, 2019. – 19 с.

35. Яковлев, К.А. Повышение эффективности технической эксплуатации лесотранспортных машин: диссертация ... доктора технических наук : 05.21.01 / Яковлев Константин Александрович; [Место защиты: Моск. гос. ун-т леса]. - Воронеж, 2013. - 389 с.

36. Сивков, Е.Н. Обоснование параметров колесного трелевочного трактора с целью снижения циркуляции мощности в трансмиссии : автореф. дис. ... канд. тех. наук. – СПб: СПбГЛТУ, 2014. – 19 с.

37. Анисимов Г.М. Лесотранспортные машины / А.М. Кочнев: под ред. Г.М. Анисимова. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 448 с.

38. Alshaer, B.J. Path planning, modeling and simulation of an autonomous articulated heavy construction machine performing a loading cycle / B.J. Alshaer, T.T. Darabseh, M.A. Alhanouti // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – Vol. 37. – № 7. – P. 5315-5325. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.042>.

39. Поплавская, Л. Ф. Оценка качества семенного и посадочного материала сосны обыкновенной, полученного на гибридно-семенной плантации / Л. Ф. Поплавская, С. В. Ребко, П. В. Тупик // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 1(204). – С. 20-24. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32472629>.

40. Novikova, T.P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology // Inventions. – 2022. – Vol. 7. – No. 1. – URL: <http://doi.org/10.3390/inventions7010001>.

41. Божко, А. В. Анализ конструкций двухосных колесных лесотранспортных машин с сочлененной рамой / А. В. Божко, В. В. Гудков, П. А. Сокол // Человек и современный мир. – 2021. – № 10(59). – С. 34-48. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46710925>.

42. Исследование компоновки лесных колесных тракторов с шарнирной рамой конструкции ЛТА: лесные тракторы Т-25АЛ и Т-40АЛ с колесной формулой 4×4 и их модификации / С. Ф. Козьмин [и др.]. – Санкт-Петербург : СПбГЛТА, 2010. – 98 с. – Режим доступа: <https://fermer.ru/files/v2/forum/158419/lmfpslm03.pdf>

43. Moreno, G. Stability of heavy articulated vehicles: effect of load distribution / G. Moreno, V. Manenti, G. Guerero et al. // *Transportation Research Procedia*. – 2018. – Vol. 33. – P. 211-218. URL: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>.
44. Кочнев, А. М. Математическая модель циркуляции мощности в трансмиссии колесного лесопромышленного трактора / А. М. Кочнев, Е. Н. Сивков // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2012. – № 199. – С. 141-150. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20468083>.
45. Попиков, П. И. Анализ процесса возникновения явления циркуляции мощности в балансирном приводе форвардеров и сортиментовозов / П. И. Попиков, В. В. Гудков, П. А. Сокол // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2018. – Т. 6. – № 7(43). – С. 71-75. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36745448>.
46. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины / В. Е. Клубничкин, Е. Е. Клубничкин, А. Ю. Горбунов, Д. Ю. Дручинин // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10. – № 4(40). – С. 217-226. – URL: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18>.
47. Fomin, K. Development concept of a domestically-produced articulated dump truck for the development of the Arctic territories of Russia / K. Fomin, U. Meike, V. Dobromirov // *Transportation Research Procedia*. – 2021. – Vol. 57. – P. 184-191. URL: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.041>.
48. Прядкин, В. И. Анализ подходов по исследованию явления циркуляции мощности в трансмиссии полноприводного автомобиля / В. И. Прядкин, В. В. Гудков, П. А. Сокол // *Лесотехнический журнал*. – 2019. – Т. 9. – № 3(35). – С. 205-224. – Режим доступа: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.3/19>.
49. Гидродинамическая передача раздельного привода ведущих мостов сочлененной лесотранспортной машины / П. А. Сокол, П. И. Попиков, В. В. Гудков, А. В. Божко // *Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 25–26 ноября 2021 года / Отв. редактор И.В. Четверикова*. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 52-56. – DOI 10.34220/MRTTMFC2021_52-56.
50. Сочлененные самоходные двухосные машины. Конструкция. Динамика. Расчет : моногр. / В.В. Гудков, П.А. Сокол, Р.В. Могутнов и др. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2022. – 181 с.
51. Wallin, E. Learning multiobjective rough terrain traversability / E. Wallin, V. Wiberg, F. Vesterlund et al. // *Journal of Terramechanics*. – 2022. – Vol. 102. – P. 17-26. URL: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.04.002>.
52. Spinelli, R. Cut-to-Length Harvesting Options for the Integrated Harvesting of the European Industrial Popular Plantations / R. Spinelli, N. Magagnotti, F. De Francesco et al. // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 9. – Article 1478. – URL: <http://doi.org/10.3390/f13091478>.

References

1. Martínez-Baroja, L. Drivers of oak establishment in Mediterranean old fields from 25-year-old woodland islets planted to assist natural regeneration / L. Martínez-Baroja, J.M. Rey-Benayas, L. Pérez-Camacho, P. Villar-Salvador // *European Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 141. – No. 1. – P. 17-30. – URL: <http://doi.org/10.1007/s10342-021-01423-7>.
2. Rodríguez, S.M. Conifer biotechnology: an overview / S.M. Rodríguez, R.J. Ordás, J.M. Alvarez // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 7. – P. 1061. – URL: <http://doi.org/10.3390/f13071061>.
3. Belyaeva, N. V. Evaluation of the effectiveness of leaving seed trees on cuttings in various types of forests / N. V. Belyaeva, N. S. Sorokina, D. A. Danilov // *Actual problems of the forest complex*. – 2022. – No. 61. – pp. 6-12. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48442043>.
4. Sviridov, L. T. The historical aspect of the problem of sorting forest seeds / L. T. Sviridov, A. I. Novikov // *Forest in the life of the Eastern Slavs from Kievan Rus to the present day : A collection of scientific papers / Responsible editor: Baginsky V. F.; Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus*. – Gomel : Forest Institute

of the National Academy of Sciences of Belarus, 2003. – P. 186-190. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23415453>.

5. Novikov, A. I. Investigation of spectrometric parameters of the seed peel of scots pine in the IR range / A. I. Novikov, V. V. Saushkin // *Forestry Engineering Journal*. – 2018. – V. 8. – № 3(31). – P. 6-15. – URL: http://doi.org/10.12737/article_5b97a164e41782.20107217.

6. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, V. A. Zelikov [et al.] // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – No 12. – P. 1064. – URL: <http://doi.org/10.3390/F10121064>.

7. Ilintsev A., Nakvasina E., Aleynikov A., Tretyakov S., Koptev S., Bogdanov A. Middle-term changes in topsoils properties on skidding trails and cutting strips after long-gradual cutting: a case study in the boreal forest of the North-East of Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2018. – Vol. 39. – No 1. – P. 71-83. – URL: <https://crojfe.com/site/assets/files/4189/ilintsev.pdf>.

8. Kormanek, M. Use of impact penetrometer to determine changes in soil compactness after Entracon Sioux EH30 timber harvesting / M. Kormanek // *Croatian journal of forest engineering*. – 2022. – Vol. 43. – № 2. – P. 325-337. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>.

9. Kormanek, M. Ground pressure changes caused by MHT 8002HV crawler harvester chassis / M. Kormanek, J. Dvořák // *Croatian journal of forest engineering*. – 2021. – Vol. 42. – № 2. – P. 201-211. – Режим доступа: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.844>.

10. Mederski, P.S. Challenges in forestry and forest engineering / P.S. Mederski, S.A. Borz, A. Đuka, A. Lazdiņš // *Croatian journal of forest engineering*. – 2021. – Vol. 42. – № 1. – P. 117-134. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.838>.

11. Fjeld, D. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development – a Norwegian field study / D. Fjeld, Ø. Østby-Berntsen // *International Journal of Forest Engineering*. – 2020. – Vol. 31. – № 3. – P. 192-196. URL: <http://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.

12. Engler, B. Rubber tracked bogie-axles with supportive rollers – a new undercarriage concept for log extraction on sensitive soils / B. Engler, S. Hoffmann, M. Zscheile // *International Journal of Forest Engineering*. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – P. 43-56. URL: <http://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.

13. Gelin, O. Concept evaluations of three novel forwarders for gentler forest operations / O. Gelin, R. Björheden // *Journal of Terramechanics*. – 2020. – Vol. 90. – P. 49-57. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.04.002>.

14. Starke, M. Rut depth evaluation of a triple-bogie system for forwarders—field trials with tls data support / M. Starke, C. Derron, F. Heubaum, M. Ziesak // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – № 16. – P. 6412. – URL: <http://doi.org/10.3390/su12166412>.

15. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, T. P. Novikova. – Voronezh : Voronezh State Forestry University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2022. – 176 p. – ISBN 978-5-7994-0976-0. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>.

16. Belyaeva, T. P. Enterprise management based on modern IPI technologies / T. P. Belyaeva // *Modeling of systems and processes*. – 2010. – № 1-2. – P. 13-18. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16519690>.

17. Belyaeva, T. P. Integrated production process management environment based on IPI technologies / T. P. Belyaeva // *Modeling of systems and processes*. – 2010. – № 1-2. – P. 18-23. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16519691>.

18. Kulak, D. Productivity and working time structure of timber forwarding in flatland thinned pine stand with the use of farm tractors / D. Kulak, G. Szewczyk, A. Stańczykiewicz // *Croatian journal of forest engineering*. – 2023. – Vol. 44. – № 1. – P. 1-11. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1656>.

19. Danilovic, M. Transport of technical roundwood by forwarder and tractor assembly from poplar plantations / M. Danilovic, D. Stojnic, S. Karic, M. Sucevic // *Nova Mehanizacija Sumarstva*. – 2014. – Vol. 35. – P. 11-22. – URL: <https://hrcak.srce.hr/clanak/180244>.

20. Prinz, R. Soil, driving speed and driving intensity affect fuel consumption of forwarders / R. Prinz, B. Mola-Yudego, J. Ala-Ilomäki et al. // *Croatian journal of forest engineering*. – 2023. – Vol. 44. – № 1. – URL: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1725>.
21. Misuno, Yu. I. Methodology of experimental studies on the assessment of operational and ecological compatibility of forest machines with soils / Yu. I. Misuno // *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. – 2021. – № 1(240). – P. 132-140. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44694937>.
22. Interaction of the wheel mover of running systems with a soil base / Yu. A. Kim, M. T. Naskovets, N. I. Zharkov, V. I. Gil // *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. – 2020. – № 1(228). – P. 143-149. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42400232>.
23. Investigation of the process of interaction of a wheel mover with a two-layer soil base / Yu. A. Kim, M. T. Naskovets, N. I. Zharkov, V. I. Gil // *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. – 2021. – № 2(246). P. 208-211. URL: <http://doi.org/10.52065/2519-402X-2021-246-26-208-211>.
24. Suzuki, L.E.A.S. Prevention of additional compaction in eucalyptus and pasture land uses, considering soil moisture and bulk density / L.E.A.S. Suzuki, D.J. Reinert, P.T. Fenner et al. // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 120. – P. 104113. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104113>.
25. Grigoriev, I.V. Advantages and disadvantages of the wheeled and tracked base of timber tractors / I.V. Grigoriev, A.I. Nikiforova, V.Y. Lisov // *Lesprominform*. – 2014. – №4 (102). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3705> (assessed: 14.11.2022).
26. Labelle, E.R. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance / E.R. Labelle, B.J. Poltorak, D. Jaeger // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2019. – Vol. 49. – № 2. – P. 164-178. – URL: <http://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0324>.
27. Blouin, V.M. Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth / V.M. Blouin, M.G. Schmidt, C.E. Bulmer, M. Krzic // *Forest Ecology and Management*. – 2008. – Vol. 255. – № 7. – P. 2444-2452. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.008>.
28. On the issue of the development of the system of energy formation of internal combustion engines / A. I. Novikov, S. V. Dorokhin, T. P. Novikova, A. G. Kashirskikh // *Alternative energy sources in road transport: problems and prospects of rational use : collection of scientific papers on the materials of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, March 20-21, 2014 / under the general editorship of A.I. Novikov*. – Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2014. – P. 272-274. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21906770>.
29. Novikov, A. I. Experience of using alternative energy sources in the transport and technological complex / A. I. Novikov // *Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use*. – 2014. – V. 1. – № 1(1). – P. 62-65. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23015125>.
30. Silaev, G.V. Tractors in forestry / G.V. Silaev, N.D. Bazdyrev. – M.: Yurayt, 2019. – 340 p.
31. Kochnev, A.M. Improving the operational properties of wheeled skidding tractors by substantiating their main parameters : abstract of the dis. ... Doctor of Technical Sciences : 05.21.01 / St. Petersburg Forestry. the academy. - Saint Petersburg, 1995. – 36 p. – Режимдоступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000087485>.
32. Gudkov, V. V. The influence of a trilled bundle of wood on the traction performance of articulated timber transport machines / V. V. Gudkov, P. A. Sokol, A.V. Bozhko // *Personnel training in conditions of transition to an innovative way of forestry development: Scientific and practical conference, Voronezh, October 21-22, 2021*. – Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2021. – P. 136-138. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47454050>.
33. Volosunov, M.V. Substantiation of the method and mechanism of turning a wheeled tracked forest transport vehicle : dissertation... Candidate of Technical Sciences : 05.21.01. — Ukhta, 2014. - 160 p.
34. Kao Hui Zhap. Justification of the parameters of the folding mechanism of wheeled forest tractors in order to increase their maneuverability : abstract of the diss. ... Cand. of tech. sciences : 05.21.01. Saint-Petersburg, 2019. 19 p.

35. Yakovlev, K.A. Improving the efficiency of technical operation of forest transport machines: dissertation... Doctors of Technical Sciences: 05.21.01. - Voronezh, 2013. - 389 p.
36. Sivkov, E.N. Justification of the parameters of a wheeled skidding tractor in order to reduce the circulation of power in the transmission : abstract. dis. ... candidate of Technical Sciences. – St. Petersburg: SPbGLTU, 2014. – 19 p.
37. Anisimov G.M. Forest transport machines / A.M. Kochnev: edited by G.M. Anisimov. – St. Petersburg: Publishing house "Lan", 2009. – 448 p.
38. Alshaer, B.J. Path planning, modeling and simulation of an autonomous articulated heavy construction machine performing a loading cycle / B.J. Alshaer, T.T. Darabseh, M.A. Alhanouti // *Applied Mathematical Modelling*. – 2013. – Vol. 37. – № 7. – P. 5315-5325. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.042>.
39. Poplavskaya, L. F. Evaluation of the quality of seed and planting material of Scots pine obtained on a hybrid seed plantation / L. F. Poplavskaya, S. V. Rebko, P. V. Tupik // *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. – 2018. – № 1 (204). – P. 20-24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32472629>.
40. Novikova, T.P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7. – No. 1. – URL: <http://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
41. Bozhko, A.V. Analysis of designs of two-axle wheeled timber transport vehicles with an articulated frame / A.V. Bozhko, V. V. Gudkov, P. A. Sokol // *Man and the modern world*. – 2021. – № 10(59). – P. 34-48. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46710925>.
42. Study of the layout of forest wheeled tractors with a hinged frame of the LTA design: T-25AL and T-40AL forest tractors with a 4x4 wheel formula and their modifications / S. F. Kozmin [et al.]. – St. Petersburg : SPbGLTA, 2010. – 98 p. – URL: <https://fermer.ru/files/v2/forum/158419/lmfpslm03.pdf>
43. Moreno, G. Stability of heavy articulated vehicles: effect of load distribution / G. Moreno, V. Manenti, G. Guero et al. // *Transportation Research Procedia*. – 2018. – Vol. 33. – P. 211-218. URL: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>.
44. Kochnev, A.M. Mathematical model of power circulation in the transmission of a wheeled timber tractor / A.M. Kochnev, E. N. Sivkov // *Izvestia of the St. Petersburg Forestry Academy*. – 2012. – № 199. – P. 141-150. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20468083>.
45. Popikov, P. I. Analysis of the process of occurrence of the phenomenon of power circulation in the balancing drive of forwarders and sorting trucks / P. I. Popikov, V. V. Gudkov, P. A. Sokol // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. – 2018. – V. 6. – № 7(43). – P. 71-75. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36745448>.
46. Development of the junction node of a forest loading and transport machine / V. E. Klubnichkin, E. E. Klubnichkin, A. Y. Gorbunov, D. Y. Druchinin // *Forestry engineering journal*. – 2020. – V. 10. – № 4(40). – P. 217-226. – URL: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18>.
47. Fomin, K. Development concept of a domestically-produced articulated dump truck for the development of the Arctic territories of Russia / K. Fomin, U. Meike, V. Dobromirov // *Transportation Research Procedia*. – 2021. – Vol. 57. – P. 184-191. URL: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.041>.
48. Pryadkin, V. I. Analysis of approaches to the study of the phenomenon of power circulation in the transmission of an all-wheel drive car / V. I. Pryadkin, V. V. Gudkov, P. A. Sokol // *Forestry engineering journal*. – 2019. – V. 9. – № 3(35). – P. 205-224. – URL: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.3/19>.
49. Hydrodynamic transmission of a separate drive of the drive axles of an articulated forest transport machine / P. A. Sokol, P. I. Popikov, V. V. Gudkov, A.V. Bozhko // *Modern resource-saving technologies and technical means of the forest complex : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, November 25-26, 2021 / Editor-in-chief I.V. Chetverikova*. – Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2021. – P. 52-56. – URK: 10.34220/MRTTMFC2021_52-56.
50. Articulated self-propelled biaxial machines. Construction. Dynamics. Calculation / V.V. Gudkov, P.A. Sokol, R.V. Mogutnov et al. – Voronezh: VUNTS VVS «VVA», 2022. – 181 p.

51. Wallin, E. Learning multiobjective rough terrain traversability / E. Wallin, V. Wiberg, F. Vesterlund et al. // Journal of Terramechanics. – 2022. – Vol. 102. – P. 17-26. URL: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.04.002>.

52. Spinelli, R. Cut-to-Length Harvesting Options for the Integrated Harvesting of the European Industrial Poplar Plantations / R. Spinelli, N. Magagnotti, F. De Francesco et al. // Forests. – 2022. – Vol. 13. – № 9. – Article 1478. – URL: <http://doi.org/10.3390/f13091478>.

Сведения об авторах

Гудков Виктор Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильной подготовки ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4691-7047>, e-mail: gydvik-51@yandex.ru.

Сокол Павел Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автомобильной подготовки ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>, e-mail: pavsokol@yandex.ru.

✉ *Божко Александр Валерьевич* – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>, e-mail: bozhkosizran@mail.ru.

Новикова Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Рибко Сергей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесных культур и почвоведения, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь; <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

Information about the authors

Viktor V. Gudkov – Cand. Sci. (Technical), Associate Professor of Department of Automotive Training, FSOMEI HE «Military Education and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation», Voronezh, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>, e-mail: gydvik-51@yandex.ru.

Pavel A. Sokol – Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer of Department of Automotive Training, FSOMEI HE «Military Education and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation», Voronezh, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>, e-mail: pavsokol@yandex.ru.

✉ *Alexandr V. Bojko* – postgraduate student (Technical), Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>, e-mail: bozhkosizran@mail.ru.

Tatyana P. Novikova, Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087, Russian Federation, 394087, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Siarhei U. Rabko – Cand. Sci. (Forestry), Docent, Head of the Department of Forest Crops and Soil Science, Educational Institution "Belarusian State Technological University", Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

✉ Для контактов/ Corresponding author