


Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>


УДК 630\*31 : 629.11.001



## Гидромеханические трансмиссии лесотранспортных машин: технологическая связь с воздействием на почвенно-растительную среду

Павел А. Сокол<sup>1</sup> ✉, [pavsokol@yandex.ru](mailto:pavsokol@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>

Александр В. Божко<sup>2</sup>, [bozhkosizran@mail.ru](mailto:bozhkosizran@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>

Татьяна П. Новикова<sup>2</sup> ✉, [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Сергей В. Ребко<sup>3</sup>, [rebko@belstu.by](mailto:rebko@belstu.by)  <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

<sup>1</sup>ФГБОУ 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

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

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

Снижение отрицательного влияния на лесную почвенно-растительную среду колесных движителей двухосных сочлененных лесотранспортных машин наряду с изменением параметров непосредственно движителей может быть эффективно осуществлено перераспределением потока мощности в гидромеханической трансмиссии. В целях обеспечения высоких тяговых показателей, и высокой проходимости через единичные препятствия (корневые системы) в условиях лесосеки необходимо учесть рациональные параметры узлов и агрегатов гидромеханической трансмиссии на основе новых научно-обоснованных технических решений. Обзор конструкций гидромеханических трансмиссий лесотранспортных машин отечественного и зарубежного производства выявил их преимущества и недостатки, влияющие на эффективность применения в условиях лесозаготовки. С первичной транспортировкой деревьев, занимающей значительный объем при лесозаготовках, эффективно справляются лесотранспортные машины с высокой энергонасыщенностью. Использование в составе агрегата гидромеханической трансмиссии перспективной конструкции гидротрансформатора для отдельного привода ведущих мостов колесных сочлененных лесотранспортных машин позволит компенсировать действие внешних сил и реакций на колесный движитель, а также минимизировать явление циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность», что будет способствовать увеличению тяговых показателей. Технологическая связь от использования разных конструкций трансмиссий характеризуется умеренной дифференциацией ( $p < 0.05$ ) по критериям воздействия на почвенную среду, основанном на использовании медианного метода в статистическом анализе сходства и различия. Будущие исследования ответят на следующие вопросы: как изменится уровень потерь полезной мощности в гидромеханической трансмиссии колесной лесотранспортной машины, оборудованной новым гидротрансформатором, в условиях постоянно меняющихся внешних воздействий? Как и насколько тесно параметры трансмиссии с новым гидротрансформатором будут влиять на показатели и проходимости лесотранспортной машины с учетом особенностей почвенно-растительной среды?

**Ключевые слова:** лесотранспортные машины, уплотнение лесной почвы, энергонасыщенность, гидромеханические трансмиссии, движитель, редуктор, циркуляция, мощность.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы 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:** Анализ применения гидромеханических трансмиссий в конструкции лесотранспортных машин / П. А. Сокол, А. В. Божко, Т. П. Новикова, С. В. Ребко // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 179–197. – Библиогр.: с. 189–196 (54 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>.


Поступила 16.05.2023. Пересмотрена 23.06.2023. Принята 24.06.2023. Опубликована онлайн 18.09.2023.

Review

### Hydro-mechanical powertrain for timber transport vehicles: technological relationship with the impact on the soil and plant environment

Pavel A. Sokol<sup>1</sup> ✉, [pavsokol@yandex.ru](mailto:pavsokol@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>

Alexander V. Bozhko<sup>2</sup>, [bozhkosizran@mail.ru](mailto:bozhkosizran@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>

Tatyana P. Novikova<sup>2</sup> ✉, [novikova\\_tp.vglt@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglt@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Siarhei U. Rabko<sup>3</sup>, [rebko@belstu.by](mailto:rebko@belstu.by)  <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

<sup>3</sup>Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus

#### Abstract

Reducing the negative impact on the forest soil and vegetation environment of wheeled propellers of biaxial articulated forest transport vehicles, along with changing the parameters of the propellers themselves, can be effectively carried out by redistributing the power flow in the hydromechanical transmission. In order to ensure high traction performance and cross-country capability through single obstacles (root systems) in the conditions of a cutting area, it is necessary to take into account the rational parameters of the components and assemblies of the hydromechanical transmission based on new scientifically sound technical solutions. A review of the designs of hydromechanical transmissions of domestic and foreign-made forest transport vehicles revealed their advantages and disadvantages that affect the effectiveness of their use in the conditions of forest exploitation. The primary transportation of trees, which occupies a significant volume during logging, is effectively handled by forest transport vehicles with high energy saturation. The use of a promising torque converter design as part of a hydromechanical transmission unit for the separate drive of the drive axles of wheeled articulated timber vehicles will compensate for the effect of external forces and reactions to the wheel mover, as well as minimize the phenomenon of power circulation in a closed loop "wheel mover – bearing surface", which will contribute to an increase in traction performance. The technological relationship from the use of different powertrain designs is characterized by moderate differentiation ( $p < 0.05$ ) according to the criteria of impact on

the soil environment, based on the use of the median method in the statistical analysis of similarities and differences. Future research will answer the following questions: how will the level of loss of useful power in the hydromechanical transmission of a wheeled forest transport vehicle equipped with a new torque converter change in conditions of constantly changing external influences? How and how closely will the transmission parameters with the new torque converter affect the performance and patency of the forest transport vehicle, taking into account the characteristics of the soil and plant environment?

**Keywords:** *timber transport machines, forest soil compaction, energy saturation, hydromechanical transmissions, mover, reducer, circulation, power.*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** the authors thank professor Alexander M. Kochnev for the advice provided in the preparation of scientific material for this article. 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:** Sokol P. A., Bozhko A. V., Novikova T. P., Rabko S. U. (2023) Analysis of the hydro-mechanical powertrain application in timber transport machines. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 179-197 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>.

**Received** 16.05.2023. **Revised** 23.06.2023. **Accepted** 24.06.2023. **Published online** 18.09.2023.

### Введение

В настоящее время актуальной и важной практической задачей в лесном комплексе является обеспечение высокой проходимости и маневренности лесотранспортных машин (ЛТМ) при первичной транспортировке деревьев в условиях переувлажненных и слабонесущих лесных дорог, при наличии естественных препятствий и ограниченного пространства лесосек [27]. В целях повышения энергонасыщенности и эффективности применения колесных сочлененных ЛТМ необходимо, чтобы они обладали высокими техническими характеристиками, которые можно достичь путем внедрения конструктивных технических решений и оптимального распределения работ [48], направленных на совершенствование конструкции трансмиссии и ходовой части, способствующих увеличению тяговых показателей. Под действием внешних факторов и условий нагружения силового агрегата происходит изменение процессов энергопреобразования [49,50] в его рабочем цикле с ростом энергетических потерь и снижением до 20% номинальной

мощности<sup>19</sup> [14,15]. Это необходимо учитывать при расчетах агрегатов трансмиссии, так как при этом происходит рассогласование показателей работы двигателя и агрегатов трансмиссии, ведет к дополнительным потерям мощности и снижению показателя эффективности применения ЛТМ до 40-60% от заявленного заводом-изготовителем. В ЛТМ с механической трансмиссией снижение производительности при выполнении операций технологического цикла будет происходить пропорционального уменьшению мощности силового двигателя. У ЛТМ с гидромеханической трансмиссией производительность может снизиться в 1.5 – 2 раза.

Наряду с этим, не менее важной экологической задачей является снижение негативного воздействия ЛТМ [42] в технологических процессах лесозэксплуатации и получении качественного лесосадовочного материала [51] при последующем лесовосстановлении. В.С. Столбин и С.А. Голякевич (2020) выделяют 9 групп факторов негативного воздействия ЛТМ в зависимости от типа окружаю-

---

<sup>19</sup> Арав Б.Л. Повышение эффективности колесных и гусеничных машин совершенствованием и стабилизацией характеристик моторно-трансмиссионных установок : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.23. 2005. 428 с.

шей среды, особое внимание уделяя «факторам, влияющим на непосредственное состояние лесных почв» [27]. Е.Д. Сабо и соавторы (2012) различают «физическое (первичное), вторичное, дрящееся в ядре уплотнения до 16 лет, и экологическое» [31] уплотнения лесной почвенной среды [32; 33], измеряемые различными методами [30, 34; 35]. Движение и работа ЛТМ влияет только на показатели первичного уплотнения. И.М. Бартенев и М.В. Драпалюк (2012) определяют пять способов редукции негативного воздействия ЛТМ на лесную почву, в число которых включают «усовершенствование конструкции тракторов и лесосечных машин» [29], в контексте данного обзора сфокусированное на гидромеханических трансмиссиях ЛТМ и циркуляции потока мощности [1] в них.

Совершенствование показателей ЛТМ возможно за счет увеличения их энергонасыщенности, способствующей повышению КПД и производительности. Исходя из этого, как в Российской Федерации (РФ), так и за рубежом, проводятся исследования, направленные на повышение эффективности функционирования гидромеханических передач в гидромеханических трансмиссиях ЛТМ, имеющих как достоинства, так и недостатки. Основным недостатком гидромеханических трансмиссий является сложная конструкция узлов и агрегатов, более низкий, чем у механических трансмиссий, КПД, наличие систем охлаждения и питания, высокая стоимость и сложность при производстве.

Применение в конструкции ЛТМ однопоточной схемы гидромеханической трансмиссии (при последовательном соединении гидротрансформатора с механической коробкой передач) способствует расширению диапазона передаточных чисел [54], дает возможность изменять скорость движения до минимально возможной, а также варьировать тяговое усилие [23,24]. Двухпоточная схема трансмиссии ЛТМ (при параллельном соединении гидротрансформатора и механической коробки передач) способствует увеличению КПД гидромеханической трансмиссии, однако сужает диапазон передаточных чисел.

При увеличении числа ведущих мостов [37-39] у ЛТМ усложняется конструкция трансмиссии

и ходовой части, приводя к повышению металлоемкости и материальных затрат на эксплуатацию [47], а также повышенным среднему и номинальному давлению [53] двигателя ЛТМ на почвенную среду [36; 40], и как следствие, увеличение глубины колеи [45] Также увеличиваются потери полезной мощности [44], которые происходят в зубчатых механических редукторах коробки перемены передач, раздаточной коробки, ведущих мостов, причем к ним добавляются «потери от циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный двигатель – опорная поверхность» [11].

Поэтому целью данного научного обзора является установление возможной технологической связи между работой гидромеханических трансмиссий ЛТМ и влиянием на лесную почвенную среду, поиск новых, научно обоснованных технических решений, направленных на увеличение КПД гидротрансформатора.

### **Материалы и методы**

#### *Предмет и объект исследования*

Трансмиссии колесных двухосных лесотранспортных машин, имеющие различные конструкции узлов, различные по величине потери полезной мощности, различные способы передачи крутящего момента, в том числе и гидромеханической.

Предмет исследования составили факторы, влияющие на тяговые показатели колесного двигателя ЛТМ, а также особенности конструкции узлов и агрегатов гидромеханической трансмиссии, способствующие потерям полезной мощности.

#### *Сбор данных*

Источниками данных для проведения исследования были следующие материалы:

- данные по соотношению различных типов трансмиссий ЛТМ (Кочнев, 2007);
- данные по повреждаемости слабонесущих грунтов лесосек (Жуков, Федоренчик, Гороновский, 2007);
- данные по распределению колесных трелевочных тракторов по типоформам (Кочнев, 2007);
- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий колесных ЛТМ (PONSSE, 2019);

- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий колесных АТМ (HSM, 2021);
- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий ЛТМ (ROTTNE, 2020);
- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий ЛТМ (АМКОДОР, 2022);
- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий ЛТМ (Кировец, 2021).

### Анализ данных

Статистические процедуры сравнения применимости трансмиссий ЛТМ осуществляли как по видам трансмиссий (таблица 1), так и по критериям (номинативные переменные CRT1-CRT7):

CRT1 – степень вероятного влияния на уплотнение почвы в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT2 – степень вероятного сдирания почвенного покрова при маневрировании на лесосеке (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT3 – степень вероятности буксования при маневрировании в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT4 – степень проходимости в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT5 – вероятность возникновения эффекта циркулирования мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» [11] при движении по лесосеке (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT6 – вероятность тяговых потерь в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая)

CRT7 – уровень затрат на приобретение и эксплуатацию (1 – низкий; 2 – умеренный; 3 – высокий).

Сходство и различие визуализировали кластерной дендрограммой, построение которой осуществляли с помощью макроса «Иерархическая кластеризация» программы SPSS Statistics, версия 25, медианным методом и оцениванием удаления номинативной переменной от центра кластера на основании интервальной меры Минковского 2 степени.

### Результаты и обсуждение

Возможная применимость трансмиссий ЛТМ с учетом воздействия на почвенную среду представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Анализ применимости трансмиссий двухосных колесных лесотранспортных машин с учетом воздействия на почвенную среду

Table 1

Analysis of the applicability of powertrain of two-axle wheeled forest transport vehicles taking into account the impact on the soil environment

Тип трансмиссии ЛТМ   FTV-powertrain type	CRT 1	CRT 2	CRT 3	CRT 4	CRT 5	CRT 6	CRT 7
Механическая   Mechanical ( <b>M</b> )	3	3	3	1	3	2	1
Гидромеханическая (на основе гидростатического звена)   hydromechanical (based on hydrostatic link) ( <b>HStat</b> )	3	3	2	2	3	2	2
Гидромеханическая (на основе гидродинамического звена – гидротрансформатора) однопоточная   hydromechanical (based on a hydrodynamic link – a torque converter) single-flow ( <b>HDin1F</b> )	2	2	2	2	2	2	2
Гидромеханическая (на основе гидродинамического звена – гидротрансформатора) двухпоточная   hydromechanical (based on a hydrodynamic link – a torque converter) two-flow ( <b>HDin2F</b> )	1	1	1	3	1	2	2
Гибридная (гидро + электро)   hybrid (hydro + electric) ( <b>Hybrid</b> )	1	1	1	3	1	3	3

Источник: собственные результаты авторов

Source: author's results

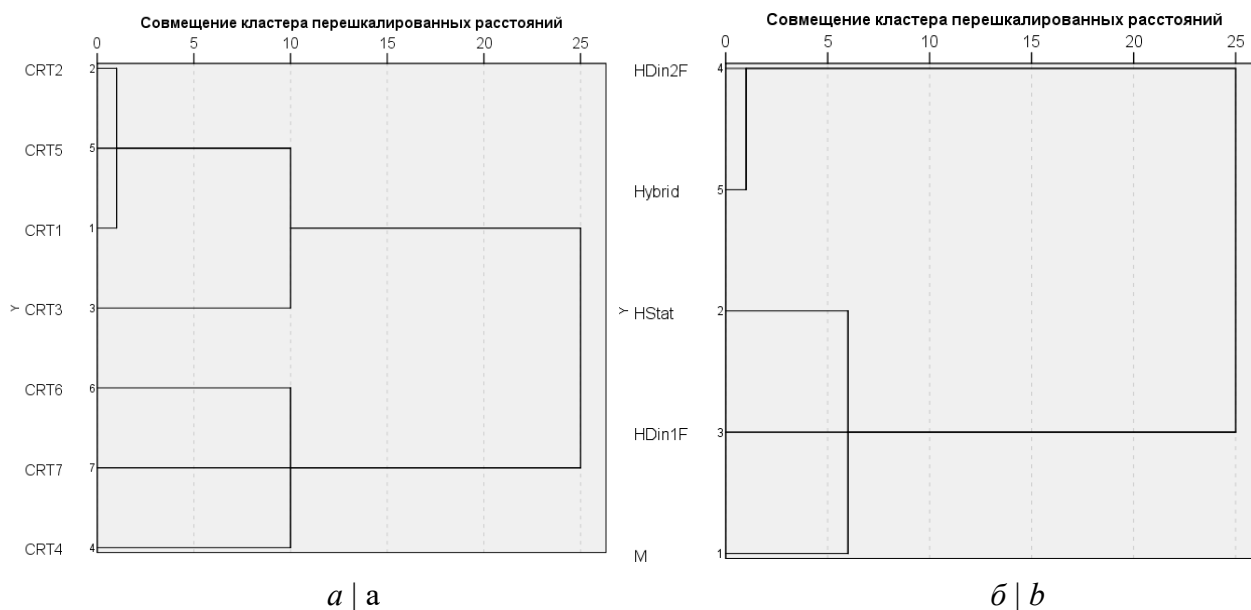


Рисунок 1. Диаграмма сходства и различия для оценки применимости трансмиссий двухосных колесных лесотранспортных машин с учетом воздействия на почвенную среду по критериям CRT1-CRT7 (а) и типам трансмиссии ЛТМ (б)

Figure 1. Diagram of similarities and differences for assessing applicability of powertrain of two-axle wheeled forest transport vehicles taking into account the impact on the soil environment according to classification CRT1-CRT7 criteria (a) and types of FTVs powertrain (b)

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Анализ конструкций трансмиссий, колесных движителей ЛТМ показал, что конструкторы как в РФ, так и за рубежом [20, 22] идут по пути широкого применения гидромеханических трансмиссий в конструкции ЛТМ, увеличения клиренса для устойчивого движения через корневые системы и пни, а также установки широкопрофильных шин увеличенного диаметра с развитыми грунтозацепами для увеличения площади их контакта с опорной поверхностью (лесной почвой)<sup>202122232425262728293031</sup>.

В работе [1] автор указал на характерную особенность работы блокированной механической трансмиссии ЛТМ, когда вследствие кинематического рассогласования ведущих колес, узлы и агрегаты трансмиссии нагружаются дополнительным моментом, и, через ее механизмы передается циркулирующая мощность, достигающая значений 50-60 % от номинальной мощности силового двигателя. Доля ЛТМ с механической трансмиссией составляет 16 %, с гидромеханической трансмиссией 75 %, а с гидрообъемной трансмиссией составляет 9 %. (рис. 2).

<sup>20</sup> Ponsse Pic, Ponssentie 22, FL 74200, Viezema, Finland, p.3

<sup>21</sup> PONSSE. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200 Viezema, Finland, p.19.

<sup>22</sup> PONSSE ELEPHANTKING. PonssePic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

<sup>23</sup> PONSSE. An agile and productive Powerhouse. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

<sup>24</sup> PONSSE. A perfect ten for efficiency. Ponsse Gazelle. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5

<sup>25</sup> PONSSE. The king-size carrier of heavy loads. Ponsse buffaloking. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

<sup>26</sup> PONSSE. Clearly more effective. Beast of burden. Ponsse buffalo. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

<sup>27</sup> HSM 208F12to. HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau. GmbH & Co.KG. ImGreutio, 74635, Neu-Kupfetz, p.2.

<sup>28</sup> HSM 208F14to. HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau. GmbH & Co.KG. ImGreutio, 74635, Neu-Kupfetz, p.2.

<sup>29</sup> ROTTNE F10 - Rottne Industri AB, Fabnksvagen, 12, 363 30 ROTTNE, Sweden, p.6.

<sup>30</sup> ROTTNE F10 - Rottne Industri AB, Fabnksvagen, 12, 363 30 ROTTNE, Sweden, p.6.

<sup>31</sup> ROTTNE F18 - Rottne Industri AB, Fabnksvagen, 12, 363 30 ROTTNE, Sweden, p.6.

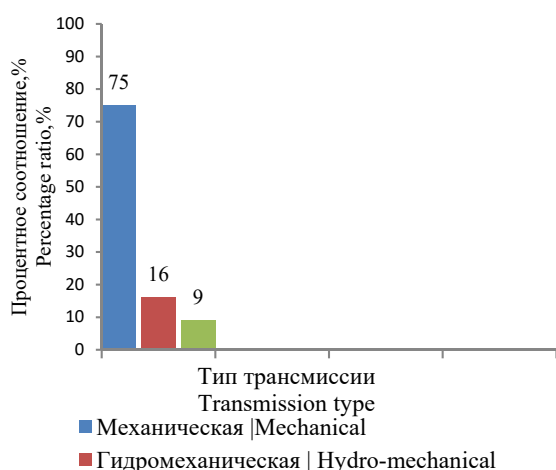


Рисунок 2. Соотношение типов трансмиссий лесотранспортных машин

Figure 2. Ratio of transmission types of forest vehicles  
 Источник: Кочнев А.М. Теория движения колесных трелевочных систем. СПб.: Издательство Политехнического университета. - 2007. - 612 с.

Source: Kochnev A.M. Theory of movement of wheeled skidding systems. – St. Petersburg: Publishing House Polytechnic University. – 2007 – p. 612.

Однако увеличение тягового усилия (основного классификационного параметра трактора), принятого в Российской Федерации, приведет, в большинстве случаев, к увеличению массы ЛТМ [3,4,16,25].

На рис. 3 показана степень разрушения верхнего слоя почвогрунтов лесосеки, с разрушением почвенно-растительного слоя (грунт III категории прочности) в летний и осенний периоды тракторами с различным типом двигателя<sup>32</sup>. Автором, в работе<sup>33</sup>, указано, что применение в лесном хозяйстве сельскохозяйственных колесных тракторов ограничено из-за их неудовлетворительной проходимости и маневренности в условиях лесосек, а также, специфической компоновки, в отдельных

случаях, препятствующей монтажу технологического оборудования.

Анализ конструкций двухосных колесных ЛТМ отечественных и зарубежных производителей показал, что у них используется шарнирно - сочлененная рама, обеспечивающая малый радиус поворота и повышение проходимости<sup>34,35,36,37</sup>.

Специальные и универсальные двухосные колесные тракторы, выпускаемые в РФ и используемые как базовая основа для ЛТМ [6], имеют сопоставимые, по сравнению с зарубежными машинами, тяговые свойства, маневренность, проходимость, они дешевле при эксплуатации.

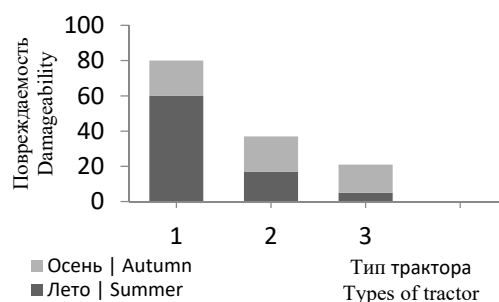


Рисунок 3. Повреждаемость слабонесущих почвогрунтов лесосек

1 – гусеничный трактор; 2 – колесный трактор с надетыми на колеса гусеницами; 3 – колесный трактор с широкопрофильными шинами

Figure 3. Damage to low-bearing soils of cutting areas  
 1 – tracked tractor; 2 – wheeled tractor with tracks on wheels; 3 – wheeled tractor with wide-profile tires

Источник: Жуков А.В., Федоренчик А.С., Гороновский А.Р. Совместимость лесных машин со средой МО РБ, БГТУ, Минск, 1999г.

Source: Zhukov A.V., Fedorenchik A.S., Goronovsky A.R. Compatibility of forest machines with the environment. Belarus, BSU, Minsk, 1999.

В трансмиссии таких ЛТМ используется несколько типов коробок переменных передач (КПП): механическая, гидромеханическая, бесступенчатая

<sup>32</sup> Жуков, А. В. Совместимость лесных машин со средой : учебное пособие для студ. вузов / А. В. Жуков, А. С. Федоренчик, А. Р. Гороновский. - Минск : БГТУ, 2000. - 48 с.

<sup>33</sup> Исследование компоновки лесных колесных тракторов с шарнирной рамой конструкции ЛТА / Лесные тракторы Т-25 АЛ и Т-40АЛ с колесной формулой 4 x 4 и их модификации: учебное пособие / сост.: С.Ф. Козьмин, М.Я. Дурманов, Г.В. Каршев, С.В. Спиридонов. - СПб.: СПбГЛТА, 2010.- 98 с.

<sup>34</sup> Трактор-ревью. Интернет- журнал о сельскохозяйственной спецтехнике. Трактор “Кировец”: модельный ряд. URL : <https://tractorreview.ru/traktory/ptz/traktor-kirovets-modelnyiy-ryad.html>

<sup>35</sup> Петербургский тракторный завод. Кировский завод. Каталог. URL : <https://kirovets-ptz.com/catalog/>

<sup>36</sup> ТД Кировец. <http://kirovets.ru>

<sup>37</sup> Каталог ОАО «АМКОДОР» - управляющая компания холдинга. Продукция. Минск.-2023. <http://amkodor.by>.

(вариатор) [20]. Механические КПП имеют достаточно высокий КПД, но они исключают переключение передач под нагрузкой без разрыва потока мощности.

### Обсуждение

Согласно материалам исследования (Бужин Ю.М., 2010)<sup>38</sup>, для работы любого зубчатого редуктора требуется некоторая мощность, причем, это конкретная величина, а не доля от передаваемой, как считалось ранее. Фактически, потери мощности складываются из некоторой постоянной минимальной величины и переменной части, зависящей от передаваемой мощности. Следовательно, при движении на режимах малой и средней мощности энергетический КПД машины будет низок, а расход горючего повышен. Поэтому, исследования по снижению потерь в зубчатых передачах и оптимизация по количеству ступеней механической трансмиссии являются актуальными.

Еще одним недостатком механических трансмиссий является наличие кинематического дифференциала, когда при изменении числа оборотов ведущих колес, кинематический дифференциал обеспечивает на выходных валах, и, следовательно, у колесного движителя одинаковую величину крутящего момента, что может привести к остановке машины при преодолении повышенных внешних сопротивлений, и, при разном по величине коэффициенте сцепления ведущих колес с ОП.

Бесступенчатые КПП позволяют подобрать оптимальное передаточное отношение при выполнении технологических операций, но они конструктивно сложнее и, при их работе возникают противоречия между режимом, выбранным оператором, и, нагрузке на силовой двигатель рассчитанной бесступенчатой КПП.

Гидромеханическая КПП позволяет переключать передачи под нагрузкой, без разрыва потока мощности, что исключает замедление движения ЛТМ при переключении передач (либо его остановку), а также исключить рывки и перегрузку при увеличении динамической нагрузки.

<sup>38</sup> Бужин Ю.М. Механический КПД коробки перемены передач мобильной машины. Теория. 2010: №12. С. 42-45.

В целях повышения тяговых показателей [26], были созданы бесступенчатые трансмиссии (гидрообъемные и электрические), с автоматическим управлением [41] и индивидуальным распределением крутящего момента по ведущим колесам (Курмаев Р.Х., 2003)<sup>39</sup>, [17-19]. Однако, их основным недостатком является малый КПД из-за двойного преобразования энергии.

В работе Хитрова Е.Г.<sup>40</sup> [45], а также других авторов [5,6] отмечено, что актуальной задачей для лесопромышленного комплекса является комплектование парка лесосечных машин в соответствии с природно-производственными условиями, необходимость дальнейшего проведения исследований, направленных на совершенствование, конструкция и параметров колесных движителей ЛТМ.

В работах [7,13,21], авторами было отмечено, что ЛТМ для первичной транспортировки деревьев принципиально отличаются от сельскохозяйственных или промышленных тракторов, особенно высокой проходимостью.

В работе [1] автором было указано, что у большинства колесных ЛТМ конструктивно применены гидростатическая или гидродинамическая трансмиссия с возможностью бесступенчатой передачи крутящего момента на ведущие колеса, что уменьшает вероятность возникновения процесса буксования и снижает интенсивность колееобразования.

В работе Трояновской М.П.<sup>41</sup>, исследуется процесс поворота колесного двухосного сочлененного трактора, из-за различных внешних нагрузок, действующих сил и реакций, «происходит перераспределение вертикальных и горизонтальных реакций опорной поверхности, действующих на колесный движитель, приводя к изменению динамических радиусов ведущих колес» [12] и «способствуя

<sup>39</sup> Курмаев Р.Х. Метод повышения эффективности полноприводной многоосной машины с гидрообъемной трансмиссией за счет использования корректирующих алгоритмов. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – 2003. – МГТУ «МАМИ». – 23 с.

<sup>40</sup> Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Архангельск, 2020. – 40 с.

<sup>41</sup> Трояновская М.П. Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов: автореф. дисс. д-ра техн. наук. – Челябинск : ЮУГУ. – 2004. – 19 с.



возникновению явления циркулирующей мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» [11].

Также, особенностью двухосных сочлененных колесных ЛТМ, является перераспределение значительных по величине реакции ОП на ведущих колесах, при криволинейном движении и складывании полурам. В результате, происходит изменение величин радиусов ведущих колес, возникновение между ними кинематического рассогласования, приводящего «к возникновению явления циркулирующей мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» [11].

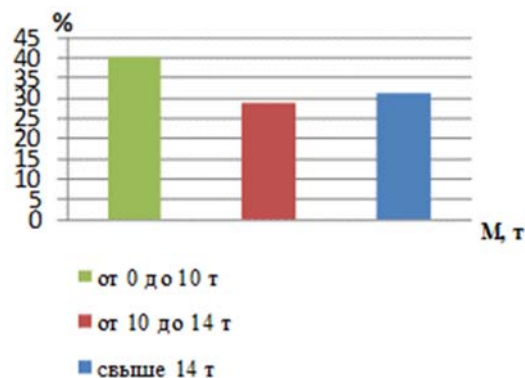
При движении колесной сочлененной ЛТМ возникают продольно-вертикальные и горизонтальные колебания полурам, приводя к значительной разгрузке переднего ведущего моста и возникновению процесса галопирования<sup>42 43</sup>.

В работе Кочнева А.М.<sup>44</sup> приведены параметры, наглядно характеризующие технические характеристики колесных трелевочных тракторов, причем, подавляющее большинство (87 %) конструктивно выполнено с гидромеханической трансмиссией (ГМТ) и компоновку по схеме 4К4 (с обоими ведущими мостами). Автор разделил колесные трелевочные тракторы по тяговым классам, указанным на рисунке 4, и, как правило, тракторы легкого класса (28,89 %) имеют механическую трансмиссию, а тракторы среднего (40 %) и тяжелого (31,11 %) классов имеют гидромеханическую трансмиссию. Также автор, на основе накопленного многолетнего опыта по результатам исследования различных моделей ЛТМ, сделал вывод, что трелевку деревьев необходимо выполнять только на специально для этого созданной технике.

<sup>42</sup> 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.

<sup>43</sup> Леденев В.В., Худяков А.В. Основные определения и принципы механики: терминологический словарь. – Тамбов: издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2012.- 96С.

<sup>44</sup> Кочнев А.М. Теория движения колесных трелевочных систем. СПб.: Издательство Политехнического университета. – 2007. – 612С.



M, т – масса трактора

Рисунок 4. Распределение колесных трелевочных тракторов по тяговым классам

Figure 4. Distribution of wheeled skidding tractors by traction classes

Источник: Кочнев А.М. Теория движения колесных трелевочных систем. СПб.: Издательство Политехнического университета. – 2007. – 612С.

Source: Kochnev A.M. Theory of movement of wheeled skidding systems. – St. Petersburg: Publishing House Polytechnic University. – 2007 – p. 612.

При проектировании новой техники требуется как рациональное планирование работ [43, 46], так и корректный подбор коэффициента демпфирования реактивного контура для оказания влияния на амплитуду резонансных колебаний, поскольку при выполнении ЛТМ технологических операций по первичной транспортировке деревьев, под действием подведенного крутящего момента, происходит угловое перемещение входных и выходных валов КПП и РК (Кочнев А.М., 2007). Конструкционные материалы для узлов и агрегатов трансмиссии целесообразно выбирать с учетом величин сил неупругого сопротивления.

В работе [8], авторами было установлено, что при снижении характеристик планетарного ряда двухпоточной гидромеханической передачи происходит увеличение ее КПД. А при повышении характеристик планетарного ряда происходит увеличение коэффициента трансформации. Таким образом, применение двухпоточной гидромеханической передачи в конструкции ЛТМ позволяет переключать передачи под нагрузкой, а также оптимально сочетать внешние нагрузки с крутящим моментом и частотой вращения коленчатого вала силового двигателя.

Основным недостатком существующих дифференциалов планетарного типа является передача повышенной мощности на менее нагруженное колесо (ось), что приводит к быстрому перераспределению мощности между ведущими колесами, что влияет на процесс движения машины вплоть до ее остановки. Поэтому, практическая задача создания дифференциального механизма с сохранением независимого вращения выходных валов и разделительного процесса передачи мощности по ведущим мостам является важной и актуальной. За основу предлагается взять гидротрансформатор с двумя выходными слабосвязанными колесами, что создает два независимых потока мощности с произвольными и независимыми значениями угловой скорости и момента на каждом из выходных валов.

Одним из вариантов решения данной актуальной задачи является оптимальное распределение крутящего момента (рис. 5,6) [9].

В конструкции предлагаемого трансформатора с приводом на два, не связанных между собой выходных вала, применены насосное колесо и два турбинных колеса для независимого привода валов переднего и заднего ведущих мостов, взаимодействующим между собой благодаря потоку жидкости.

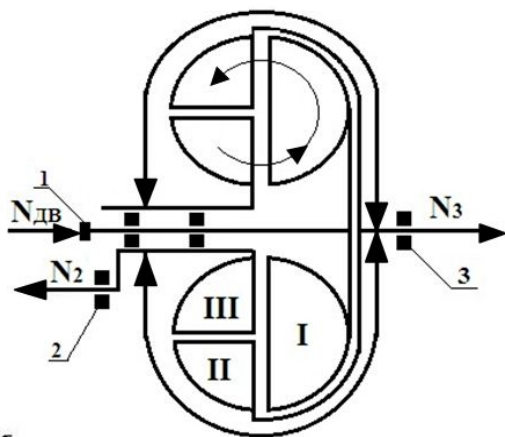


Рисунок 5. Схема гидродинамической передачи для раздельного и независимого привода ведущих мостов

Figure 5. Hydrodynamic transmission scheme for separate and independent drive of drive axles

Источник: Собственная схема авторов [9]

Source: authors' own scheme [9]

Если во время движения ЛТМ один из выходных валов гидродинамической передачи будет заморожен, то второй выходной вал из-за связи через поток жидкости от насосного колеса продолжит вращение.

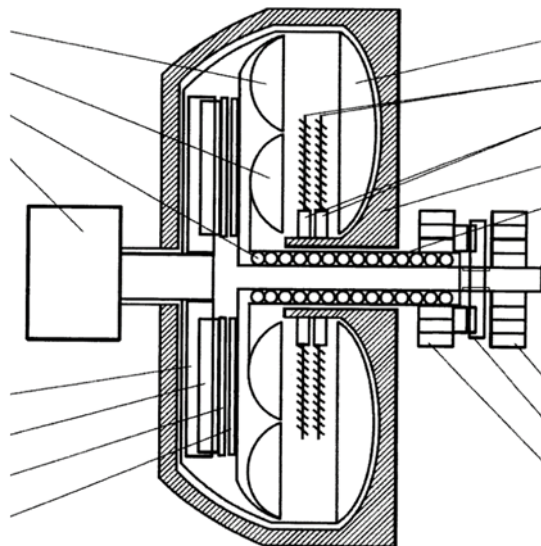


Рисунок 6. Схема гидротрансформатора гидромеханической передачи для раздельного привода ведущих мостов колесного движителя

Figure 6. The scheme of the torque converter of the hydro-mechanical transmission for the separate drive of the wheel drive axles

Источник: Собственная схема авторов [9]

Source: authors' own scheme [9]

Главная особенность и отличие от механической системы состоит в том, что момент на ведущих колесах будет создаваться только из-за циркуляции жидкости, и, будет характеризоваться только параметрами ее движения, и не будет составлять его наименьшую величину, как в механической системе.

В соответствии с целью исследований, в будущем планируется разработать имитационную модель предлагаемого авторами гидротрансформатора, с целью корректного «описания гидравлических и механических процессов, происходящих при работе узлов и агрегатов гидромеханической трансмиссии при взаимодействии колесного движителя и опорной поверхности (почвы)» [12].

### Заключение

Для устойчивого развития лесного машиностроения, поддержки предпринимательства в лесном секторе [52] и, следуя политике импортозамещения, необходимо разработать надежные, конкурентоспособные ЛТМ с высокими тяговыми показателями, адаптированные для эксплуатации на слабонесущих грунтах лесосек [3].

Проведенный анализ существующих конструкций гидромеханических трансмиссий колесных двухосных ЛТМ, а также обзор научных исследований позволил установить наиболее существенные факторы, влияющие на их тяговые показатели и показатель эффективности применения. Установлено, что от действия явления циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» теряется до 50 % полезной тяговой мощности.

С целью увеличения силы тяги ведущими колесами и тяговой мощности до 30 % авторами предложена новая перспективная конструкция гидротрансформатора гидродинамической передачи для отдельного и независимого привода ведущих мостов. При этом, мощность силового агрегата до 80 % будет реализована в виде тяговой мощности, а ее потери из-за действия внешних факторов будут составлять до 20 %, способствуя увеличению сменной и годовой производительности до 20 %.

Ее применение будет способствовать снижению потерь тяговой мощности до 20 % путем минимизации действия «явления циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность»» [10], и увеличению тяговых показателей ЛТМ до 30%.

### Список литературы

1. Сивков, Е. Н. Обоснование параметров колесного трелевочного трактора с целью снижения циркуляции мощности в трансмиссии : дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. – Санкт-Петербург, 2014. – 173 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22348775>.
2. Григорьев, И. В. Состояние и перспективы развития лесного машиностроения в России / И. В. Григорьев, В. А. Кацадзе // Инновации в промышленности и социальной сфере : материалы республиканской научно-практической конференции, Петрозаводск, 16 марта 2015 года / Петрозаводский государственный университет. – Петрозаводск: ООО «Verso», 2015. – С. 27–30. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23256207>.
3. Коршун, В. Н. Гибридная трансмиссия лесохозяйственного трактора / В. Н. Коршун, И. В. Кухар, Д. Е. Шпагин // Машиностроение: новые концепции и технологии : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 23–24 октября 2019 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2019. – С. 198–202. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41493272>.
4. Korshun, V. Energy efficiency in forestry machinery / V. Korshun, I. Kuchar, A. Kamaukhov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, 01–02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725311. – DOI 10.1109/Eastconf.2019.8725311.
5. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // Inventions. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
6. Двухосные сочлененные лесотранспортные машины в условиях лесосеки: оценка применимости / В. В. Гудков, П. А. Сокол, А. В. Божко [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4 (48). – С. 77–95. – DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>. URL: <https://www.elibrary.ru/gqydzw>.
7. Рудов, М. Е. Оценка влияния трелемой пачки лесоматериалов на уплотнение лесного почвогрунта: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / М. Е. Рудов. – Петрозаводск, 2015. – 21 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381861>.

8. К вопросу о выборе параметров двухпоточной гидромеханической передачи для промышленных и лесопромышленных тракторов / В. М. Шарипов, Г. О. Котиев, Ю. С. Щетинин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 3. – С. 8–14. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25675744>.
9. Патент на изобретение № 2788351 РФ, МПКF16H 41/24. Гидротрансформатор гидромеханической передачи для раздельного привода ведущих мостов колесного движителя / В.В. Гудков, А.А. Колтаков, П.А. Сокол, Р.В. Могутнов, А.В. Жердев, А.В. Божко ; заявитель ВУНЦ ВВС "ВВА", Центр ОНР и ПНПК. - № 2022116101 ; заявл. 14.06.2022 ; опубл. 17.01.2023. URL: <https://www.elibrary.ru/vbzdwy>.
10. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>.
11. Попиков, П. И. Анализ применения балансирного колесного движителя в конструкции дорожных и лесозаготовительных машин / П. И. Попиков, В. В. Гудков, П. А. Сокол // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8, № 4 (32). – С. 240–250. – DOI: 10.12737/article\_5c1a323cc34ab8.00158395. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>.
12. Бартенев, И. М. Силовое взаимодействие блокированного колесного движителя лесотранспортной машины с опорной поверхностью / И. М. Бартенев, П. И. Попиков, П. А. Сокол // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 4(40). – С. 269–273. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676651>.
13. Pintsev 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. – DOI: <https://10.5552/crojfe.2018.4189>. – URL: <https://crojfe.com/site/assets/files/4189/ilintsev.pdf>.
14. 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. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.
15. 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.
16. Borz S. A., Marcu M. V., Cataldo M. F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder prototype under conditions of steep-terrain low-access forests // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2021. – Т. 42. – №. 2. – P. 185–200. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.775>.
17. Liang H. et al. Research on Torque Optimization Allocation Strategy about Multi-wheel Vehicles // Innovative Techniques and Applications of Modelling, Identification and Control: Selected and Expanded Reports from ICMIC'17. – 2018. – P. 63–92. [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7212-3\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7212-3_5).
18. Leitner S. et al. Tower yarder powertrain performance simulation analysis: electrification study // European Journal of Forest Research. – 2023. – Т. 142. – №. 4. – P. 739–761. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-023-01553-0>.
19. Karlušić J. et al. Benefit assessment of skidder powertrain hybridization utilizing a novel cascade optimization algorithm // Sustainability. – 2020. – Т. 12. – №. 24. – P. 10396. <http://dx.doi.org/10.3390/su122410396>.
20. Wooten T. Adaptive mild hybrid powertrain for four-wheel driven tractors // ATZoffhighway worldwide. – 2017. – Т. 10. – №. 2. – P. 8–13. <http://dx.doi.org/10.1007/s41321-017-0021-8>.
21. Zhu Z. et al. Design and Analysis of a Novel Mechanic-Electronic-Hydraulic Powertrain System for Agriculture Tractors // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – P. 153811–153823. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2021.3126667>.

22. Bergmann D., Petri S. Holistic control concepts for tractors //ATZoffhighway worldwide. – 2017. – Т. 10. – P. 32-37. <https://doi.org/10.1007/s41321-017-0053-0>.
23. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance //Forests. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – Article 103. <http://dx.doi.org/10.3390/f14010103>.
24. LaClair T. J. Application of a tractive energy analysis to quantify the benefits of advanced efficiency technologies for medium-and heavy-duty trucks using characteristic drive cycle data //SAE International Journal of Commercial Vehicles. – 2012. – Т. 5. – №. 2012-01-0361. – P. 141–163. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0361>.
25. Ani O. A. et al. Modeling and multiobjective optimization of traction performance for autonomous wheeled mobile robot in rough terrain //Journal of Zhejiang University SCIENCE C. – 2013. – Т. 14. – №. 1. – С. 11–29. <https://doi.org/10.1631/jzus.C12a0200>.
26. Kim J., Lee J. Traction-energy balancing adaptive control with slip optimization for wheeled robots on rough terrain // Cognitive systems research. – 2018. – Т. 49. – P. 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.01.007>.
27. Mederski P. S. et al. Challenges in forestry and forest engineering—Case studies from four countries in East Europe // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2021. – Т. 42. – №. 1. – P. 117–134. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.838>.
28. Столбин, В. С. Анализ научных исследований в области оценки экологического воздействия лесопромышленных машин и технологий на лесные экосистемы / В. С. Столбин, С. А. Голякевич // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2(234). – С. 149–159. – URL: <https://www.elibrary.ru/noyhnm>.
29. Бартнев, И. М. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 1(5). – С. 61-66. – URL: <https://www.elibrary.ru/oxdpch>.
30. Захаров, С. Г. Тропа и рекреационная нагрузка: новый метод определения уплотнения почв на тропах / С. Г. Захаров, И. В. Кулик // Географический вестник. – 2017. – № 2(41). – С. 109-117. – DOI 10.17072/2079-7877-2017-2-109-117. – URL: <https://elibrary.ru/ytoqmtю>.
31. Сабо, Е. Д. Виды и динамика уплотнения и разуплотнения почв на вырубках / Е. Д. Сабо, О. В. Кормилицына, В. В. Бондаренко // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2012. – № 3. – С. 42–45. – URL: <https://elibrary.ru/oylawn>.
32. The effects of soil compaction mitigation on below-ground fauna: How earthworms respond to mechanical loosening and power harrow cultivation / K. J. Lees, A. J. McKenzie, J. P. Newell Price et al. // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2016. – Vol. 232. – P. 273–282. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.026>.
33. Acquah, K. Soil Compaction from Wheel Traffic under Three Tillage Systems / K. Acquah, Y. Chen // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020219>.
34. Impact of MHT9002HV Tracked Harvester on Forest Soil after Logging in Steeply Sloping Terrain / M. Kormanek, J. Dvořák, P. Tylek et al. // Forests. – 2023. – Vol. 14. – № 5. – P. 977. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14050977>.
35. Seasonal changes of perlite–peat substrate properties in seedlings grown in different sized container trays / M. Kormanek, S. Małek, J. Banach et al. // New Forests. – 2020. – № 0123456789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09793-3>.
36. 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. – DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.844>.
37. 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. – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>.

38. 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. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.
39. 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. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.
40. 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. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.04.002>.
41. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI 10.1088/1755-1315/392/1/012035. – URL: <https://elibrary.ru/ddrbrq>.
42. Reducing the impact of transport machinery and equipment on the environment during reforestation: An innovative approach / M. S. Khripchenko [et al.] // *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference*. – Granada, 2019. – P. 2438–2445. – URL: <https://elibrary.ru/mbfcwn>.
43. Беляева, Т. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / Т. П. Беляева, А. П. Затворницкий // *Информационные системы и технологии*. – 2013. – № 3(65). – С. 5–10. – URL: <https://elibrary.ru/ntnxin>.
44. Бартнев, И. М. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин / И. М. Бартнев, Е. В. Поздняков // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 3(11). – С. 114–123. – URL: <https://elibrary.ru/rqqreb>.
45. Хитров, Е. Г. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах / Е. Г. Хитров, И. М. Бартнев // *Лесотехнический журнал*. – 2016. – Т. 6, № 4(24). – С. 233–239. – DOI 10.12737/23463. – URL: <https://elibrary.ru/xhjhhv>.
46. Беляева, Т. П. Система управления формированием и реализацией проектов дизайн центра микроэлектроники: дис. ... канд. техн. наук / Т. П. Беляева. – Воронеж, 2012. – 147 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/qfmmjj>.
47. Математическая модель распределения трудовых ресурсов при технической эксплуатации и ремонте автотранспортных средств / С. В. Дорохин [и др.] // *Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса*. – Орел, 2016. – С. 133–139. – URL: <https://www.elibrary.ru/vxxdjz>.
48. Алгоритм решения задачи оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах / А. И. Новиков [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2014. – Т. 4, № 4 (16). – С. 309–317. – DOI 10.12737/8515. – URL: <https://elibrary.ru/tondhd>.
49. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания / А. И. Новиков [и др.] // *Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования*. – Воронеж, 2014. – Т. 1. – С. 272–274. – URL: <https://elibrary.ru/slkaqt>.
50. 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. – URL: <https://elibrary.ru/tjqqlq>.
51. Роль качества лесного репродуктивного материала при лесовосстановлении / В. Иветич [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2019. – Т. 9, № 2 (34). – С. 56–65. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7. – URL: <https://elibrary.ru/hsenfb>.
52. Формы поддержки развития предпринимательства в лесном секторе ЦЧР / С. С. Морковина, Ю. Г. Денисова, О. И. Драпалюк, Б. Шанянь // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 4 (12). – С. 210–216. – URL: <https://elibrary.ru/rtvozn>.

53. О сопоставлении среднего и номинального давления движителя лесной машины на почвогрунт / Е. Г. Хитров, Е. В. Котенев, А. В. Андронов [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – № 229. – С. 185–195. – DOI 10.21266/2079-4304.2019.229.185-195. – URL: <https://www.elibrary.ru/qdwnun>.

54. Методика определения оптимальных рабочих передаточных чисел гидромеханической трансмиссии трелевочного трактора / К. Ву Хай, В. Л. Довжик, А. В. Андронов, О. А. Михайлов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2014. – № 208. – С. 73–83. – URL: <https://www.elibrary.ru/thivaj>.

### References

1. Sivkov, E. N. Justification of the parameters of a wheeled skidding tractor in order to reduce the power circulation in the transmission : specialty 05.21.01 "Technology and machines of logging and forestry" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Sivkov Evgeny Nikolaevich. - St. Petersburg, 2014. – 173 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22348775>.

2. Grigoriev, I. V. State and prospects of development of forest engineering in Russia / I. V. Grigoriev, V. A. Katsadze // Innovations in industry and social sphere: Materials of the Republican scientific and practical conference, Petrozavodsk, March 16, 2015 / Petrozavodsk State University. – Petrozavodsk: ООО "Verso", 2015. – pp. 27-30. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23256207>.

3. Korshun, V. N. Hybrid transmission of forestry tractor / V. N. Korshun, I. V. Kukhar, D. E. Shpagin // Mechanical engineering: new concepts and technologies : collection of articles of the All-Russian Scientific and practical Conference of students, postgraduates and young scientists, Krasnoyarsk, October 23-24, 2019. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2019. – pp. 198-202. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41493272>

4. Korshun, V. Energy efficiency in forestry machinery / V. Korshun, I. Kuchar, A. Kamaukhov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, 01–02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725311. – DOI 10.1109/Eastonf.2019.8725311.

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

6. Biaxial articulated forest transport machines in the conditions of a cutting area: assessment of applicability / V. V. Gudkov, P. A. Sokol, A.V. Bozhko [et al.] // Forestry Journal. – 2022. – Vol. 12, No. 4(48). – pp. 77-95.– DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6.

7. Rudov, M. E. Assessment of the impact of a trellised bundle of timber on the compaction of forest soil : specialty 05.21.01 "Technology and machines of logging and forestry" : abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Rudov Maxim Evgenievich. – Petrozavodsk, 2015. – 21 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381861>

8. On the question of choosing the parameters of a two-flow hydromechanical transmission for industrial and timber tractors / V. M. Sharipov, G. O. Kotiev, Yu. S. Shchetinin [et al.] // Tractors and agricultural machines. – 2016. – No. 3. – pp. 8-14.– URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25675744>

9. Patent for invention No. 2788351 of the Russian Federation, IPC F16H 41/24. Hydro-mechanical transmission torque converter for separate drive of wheel drive axles / V.V. Gudkov, A.A. Koltakov, P.A. Sokol, R.V. Mogutnov, A.V. Zherdev, A.V. Bozhko ; applicant VUNTS VVS "VVA", Center ONR and PNPК. - No. 2022116101 ; application. 14.06.2022 ; publ. 17.01.2023.

10. 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 Forestry Engineering University named

after G.F. Morozov, 2021. – pp. 52-56. – DOI 10.34220/MRTTMFC2021\_52-56. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>

11. Popikov, P. I. Analysis of the use of a balancing wheel mover in the construction of road and logging machines / P. I. Popikov, V. V. Gudkov, P. A. Sokol // *Forestry Journal*. – 2018. – Vol. 8, No. 4(32). – pp. 240-250. – DOI 10.12737/article\_5c1a323cc34ab8.00158395. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>

12. Bartenev, I. M. Force interaction of a blocked wheeled mover of a forest transport vehicle with a support surface / I. M. Bartenev, P. I. Popikov, P. A. Sokol // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. – 2018. – Vol. 6, No. 4(40). – pp. 269-273. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676651>

13. 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>.

14. 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: DOI: 10.1080/14942119.2020.1765645

15. 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: DOI: 10.1080/14942119.2021.1834814

16. Borz S. A., Marcu M. V., Cataldo M. F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder prototype under conditions of steep-terrain low-access forests // *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*. – 2021. – T. 42. – № 2. – P. 185-200. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.775>.

17. Liang H. et al. Research on Torque Optimization Allocation Strategy about Multi-wheel Vehicles // *Innovative Techniques and Applications of Modelling, Identification and Control: Selected and Expanded Reports from ICMIC'17*. – 2018. – P. 63-92. [http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7212-3\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7212-3_5).

18. Leitner S. et al. Tower yarder powertrain performance simulation analysis: electrification study // *European Journal of Forest Research*. – 2023. – T. 142. – №. 4. – P. 739-761. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-023-01553-0>.

19. Karlušić J. et al. Benefit assessment of skidder powertrain hybridization utilizing a novel cascade optimization algorithm // *Sustainability*. – 2020. – T. 12. – №. 24. – P. 10396. <http://dx.doi.org/10.3390/su122410396>.

20. Woopen T. Adaptive mild hybrid powertrain for four-wheel driven tractors // *ATZoffhighway worldwide*. – 2017. – T. 10. – №. 2. – P. 8-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s41321-017-0021-8>.

21. Zhu Z. et al. Design and Analysis of a Novel Mechanic-Electronic-Hydraulic Powertrain System for Agriculture Tractors // *IEEE Access*. – 2021. – T. 9. – P. 153811-153823. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2021.3126667>.

22. Bergmann D., Petri S. Holistic control concepts for tractors // *ATZoffhighway worldwide*. – 2017. – T. 10. – P. 32-37. <http://dx.doi.org/10.1007/s41321-017-0053-0>.

23. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance // *Forests*. – 2023. – T. 14. – №. 1. – Article 103. <http://dx.doi.org/10.3390/f14010103>.

24. LaClair T. J. Application of a tractive energy analysis to quantify the benefits of advanced efficiency technologies for medium-and heavy-duty trucks using characteristic drive cycle data // *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. – 2012. – T. 5. – №. 2012-01-0361. – P. 141-163. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0361>.

25. Ani O. A. et al. Modeling and multiobjective optimization of traction performance for autonomous wheeled mobile robot in rough terrain // *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*. – 2013. – T. 14. – №. 1. – C. 11-29. <https://doi.org/10.1631/jzus.C12a0200>.

26. Kim J., Lee J. Traction-energy balancing adaptive control with slip optimization for wheeled robots on rough terrain // *Cognitive systems research*. – 2018. – T. 49. – P. 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.01.007>.



27. Mederski P. S. et al. Challenges in forestry and forest engineering—Case studies from four countries in East Europe // *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*. – 2021. – Т. 42. – № 1. – P. 117-134. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.838>.
28. Stolbin, V. S. Analysis of scientific research in the field of assessing the environmental impact of forestry machines and technologies on forest ecosystems / V. S. Stolbin, S. A. Golyakevich // *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. – 2020. – № 2(234). – P. 149-159. – URL: <https://www.elibrary.ru/noyhnm>.
29. Bartenev, I. M. Reducing the harmful effects of forest tractors and cutting machines on soil and plantings / I. M. Bartenev, M. V. Drapalyuk // *Forestry Engineering Journal*. – 2012. – № 1(5). – P. 61-66. – URL: <https://www.elibrary.ru/oxdpch>.
30. Zakharov, S. G. Trop and recreational Grub: a new method of defining the soil of Trop / s. G. Zakharov, I. V. Kulik // *geographical Journal*. – 2017. – № 2(41). – P. 109-117. – DOI 10.17072/2079-7877-2017-2-109-117. – URL: <https://elibrary.ru/ytqmtro>.
31. Sabo, E. D. Types and dynamics of compaction and decompression of soils in cuttings / E. D. Sabo, O. V. Kormilitsyna, V. V. Bondarenko // *Bulletin of the Moscow State University of the Forest - Forest Bulletin*. – 2012. – No. 3. – P. 42-45. – URL: <https://elibrary.ru/oylawn>.
32. Lees, K.J. The effects of soil compaction mitigation on below-ground fauna: How earthworms respond to mechanical loosening and power harrow cultivation / K.J. Lees, A.J. McKenzie, J.P. Newell Price et al. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2016. – Vol. 232. – P. 273-282. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.026>.
33. Acquah, K. Soil Compaction from Wheel Traffic under Three Tillage Systems / K. Acquah, Y. Chen // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020219>.
34. Kormanek, M. Impact of MHT9002HV Tracked Harvester on Forest Soil after Logging in Steeply Sloping Terrain / M. Kormanek, J. Dvořák, P. Tylek et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 5. – P. 977. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14050977>.
35. Kormanek, M. Seasonal changes of perlite–peat substrate properties in seedlings grown in different sized container trays / M. Kormanek, S. Małek, J. Banach et al. // *New Forests*. – 2020. – № 0123456789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09793-3>.
36. 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. – DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.844>.
37. 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. – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>.
38. 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. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.
39. 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. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.
40. 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. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.04.002>.
41. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI 10.1088/1755-1315/392/1/012035. – URL: <https://elibrary.ru/ddrbrq>.

42. Reducing the impact of transport machinery and equipment on the environment during reforestation: An innovative approach / M. S. Khripchenko, A. I. Novikov, A. Goncharov, E. V. Snyatkov // Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020 : 33, Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020, Granada, 10–11 апреля 2019 года. – Granada, 2019. – P. 2438-2445. – <https://elibrary.ru/mbfewn>.

43. Belyaeva, T. P. Optimal planning of complex projects for the creation of an electronic component base / T. P. Belyaeva, A. P. Zatornitsky // Information systems and technologies. – 2013. – № 3(65). – P. 5-10. – URL: <https://elibrary.ru/ntnxin>.

44. Bartenev, I. M. The wearing capacity of soils and its effect on the durability of the working bodies of tillage machines / I. M. Bartenev, E. V. Pozdnyakov // Forestry Engineering Journal. – 2013. – № 3(11). – P. 114-123. – URL: <https://elibrary.ru/rqqpeb>.

45. Khitrov, E. G. Calculation of the track depth of a wheeled mover of forest tractors on slopes / E. G. Khitrov, I. M. Bartenev // Forestry Engineering Journal. – 2016. – Vol. 6, No. 4(24). – P. 233-239. – DOI 10.12737/23463. – URL: <https://elibrary.ru/xjhjhv>.

46. Belyaeva, T. P. Management system for the formation and implementation of microelectronics design center projects: dis. ... candidate of Technical Sciences. – Voronezh, 2012. – 147 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/qfmmjj>.

47. Dorokhin S.V. Mathematical model of the distribution of labor resources in the technical operation and repair of motor vehicles / S.V. Dorokhin [et al.] // Topical issues of innovative development of the transport complex. – Orel, 2016. – pp. 133-139. – URL: <https://www.elibrary.ru/vxxdjz>.

48. Novikov, A. I. Algorithm for solving the problem of optimal distribution of work in network canonical structures / A. I. Novikov [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2014. – Vol. 4, No. 4(16). – P. 309-317. – DOI 10.12737/8515. – URL: <https://elibrary.ru/tondhd>.

49. 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. – Voronezh: VGLTU, 2014. – Vol. 1. – P. 272-274. – URL: <https://elibrary.ru/slkaqt>.

50. Novikov, A. I. Experience of using alternative energy sources in the transport and technological complex // Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use. – 2014. – Vol. 1, No. 1(1). – P. 62-65. – URL: <https://elibrary.ru/tjqqld>.

51. Ivetic, V. The role of the quality of forest reproductive material in reforestation / V. Ivetic [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2019. – Vol. 9, No. 2(34). – pp. 56-65. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7. – URL: <https://elibrary.ru/hsenfb>.

52. Forms of support for the development of entrepreneurship in the forest sector of the Central Chernozem region / S. S. Morkovina, Yu. G. Denisova, O. I. Drapalyuk, B. Shan Yang // Forestry engineering journal. – 2013. – No. 4(12). – P. 210-216. URL: <https://elibrary.ru/rtvozn>.

53. On the comparison of the average and nominal pressure of the propeller of a forest machine on the soil / E. G. Khitrov, E. V. Kotenev, A.V. Andronov [et al.] // Izvestia of the St. Petersburg Forestry Academy. - 2019. - No. 229. – pp. 185-195. – DOI 10.21266/2079-4304.2019.229.185-195. – URL: <https://www.elibrary.ru/qdwnun>.

54. Methodology for determining the optimal working gear ratios of the hydraulic transmission of a skidding tractor / K. Wu Hai, V. L. Dovzhik, A.V. Andronov, O. A. Mikhailov // Izvestia of the St. Petersburg Forestry Academy. – 2014. – No. 208. – pp. 73-83. – URL: <https://www.elibrary.ru/thivaj>.

### Сведения об авторах

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

*Александр Владимирович Божко* – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>, e-mail: [bozhkosizran@mail.ru](mailto: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](mailto: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](mailto:rebko@belstu.by).

### Information about the authors

✉ *Pavel A. Sokol* – PhD (Engineering), Senior Lecturer of Department of Automotive Training, 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](mailto:pavsokol@yandex.ru).

*Alexandr V. Bozhko* – assistants of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>; e-mail: [bozhkosizran@mail.ru](mailto:bozhkosizran@mail.ru).

✉ *Tatyana P. Novikova*, Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto: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](mailto:rebko@belstu.by).

✉ – Для контактов/Corresponding author