

УДК 621.7-114

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И ТРИБОСИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ХАРВЕСТЕРОВ

Е.А. Памфилов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>

В.В. Капустин¹, аспирант; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>

Г.А. Пилюшина¹, д-р техн. наук; ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>

Е.В. Шевелева², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [H-2080-2019](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1763-6932>

¹Брянский государственный технический университет, б-р 50-летия Октября, д. 7, г. Брянск, Россия, 241035; e-mail: epamfilov@yandex.ru, vovakapustin1990@mail.ru, gal-pi2009@yandex.ru

²Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Дмитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; e-mail: elshev78@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 12.10.20 / Принята к печати 28.12.20

Аннотация. Конкурентоспособность предприятий лесного комплекса во многом обусловлена уровнем использования надежной и высокопроизводительной техники, позволяющей достичь существенного повышения эффективности заготовки и переработки древесины. При этом требуемый уровень надежности лесозаготовительных машин в значительной степени определяется работоспособностью их функциональных узлов, осуществляющих выполнение основных технологических операций. Соответственно, при создании перспективных образцов указанной техники важной является разработка и реализация путей и способов повышения работоспособности функциональных узлов машин. Для этого необходим анализ перспектив и технических возможностей совершенствования основных механизмов и узлов лесозаготовительных машин, лимитирующих их работоспособность факторов. В целях повышения работоспособности функциональных узлов машин требуется согласованное обеспечение благоприятных уровней значительного числа конструкторско-технологических параметров. В частности, целесообразны оптимизация характера относительного перемещения поверхностей деталей и снижение действующих на них нагрузок. Это связано с тем, что указанные факторы определяют износостойкость и сопротивляемость трению, а также тепловой режим работы машины, напряженное состояние функциональных поверхностных слоев и прочность неподвижных соединений. При этом следует принимать во внимание влияние условий эксплуатации, интенсивность изнашивания и срок службы исследуемых объектов. Такой подход обусловлен тем, что триботехнические узлы лесозаготовительных машин выполняют свои функции при действии высоких ударных, циклических и вибрационных нагрузок в широком диапазоне жестких природно-климатических условий, отличающихся низкими температурами, повышенной влажностью, действием химических и абразивных сред. Все это должно учитываться в процессе поиска эффективных путей повышения работоспособности функциональных узлов, в т. ч. и манипуляторов лесозаготовительных машин, достигаться за счет регламентируемого направленного управления свойствами поверхностных слоев при проектировании и изготовлении фрикционно-контактирующих деталей. Обоснована необходимость созда-

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

ния научно-инженерных основ повышения работоспособности функциональных узлов и рабочих органов машин, а также достижения при этом требуемой производительности, долговечности и безотказности техники. Уточняются задачи дальнейших исследований, направленных на получение информации, отсутствие которой делает невозможным создание отечественной импортозамещающей техники.

Для цитирования: Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Шевелева Е.В. Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 135–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149

Ключевые слова: работоспособность, триботехнические узлы, динамические нагрузки, изнашивание, лесозаготовительные машины, шарниры, манипулятор.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF WORKING BODIES AND TRIBOSYSTEMS OF HARVESTER TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

*Evgeny A. Pamfilov*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1866-2019](https://orcid.org/0000-0002-1522-7246),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-7246>

*Vladimir V. Kapustin*¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAT-1199-2020](https://orcid.org/0000-0002-5207-172X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-172X>

*Galina A. Pilyushina*¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [H-1699-2019](https://orcid.org/0000-0002-2422-0919),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2422-0919>

*Elena V. Sheveleva*², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2080-2019](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1763-6932>

¹Bryansk State Technical University, b-r 50-letiya Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation; e-mail: epamfilov@yandex.ru, vovakapustin1990@mail.ru, gal-pi2009@yandex.ru

²Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; e-mail: elshev78@yandex.ru

Original article / Received on October 12, 2020 / Accepted on December 28, 2020

Abstract. Ensuring the competitiveness of enterprises of the forest complex is largely due to the level of reliable and high-performance equipment use, since this achieves a significant increase in the efficiency of timber harvesting and processing. At the same time, the required level of reliability of logging machines is largely determined by the performance of their functional units that carry out the basic technological operations. Accordingly, the development and implementation of ways and methods to improve the performance of functional units of machines is important when creating promising models of the specified equipment. This requires an analysis of the prospects and technical possibilities for improving the main mechanisms and units of logging machines and the factors limiting their performance. In order to improve the performance of machine functional units, it is essential to ensure the coordinated provision of favorable levels of a significant number of design and technological parameters. In particular, it is advisable to optimize the nature of the relative movement of the friction-contacting surfaces of the parts and reduce the loads acting on them. This is due to the fact that these factors determine the wear resistance and friction resistance, as well as the thermal mode of the machine operation, the stress state of the functional surface layers and the strength of the fixed joints. At the same time, the influence of operating conditions, the wear intensity and service life of the objects under study should be taken into account. This

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

approach is due to the fact that tribotechnical units of logging machines perform their functions under the action of high shock, cyclic and vibration loads, in a wide range of harsh natural and climatic conditions characterized by low temperatures, high humidity, and the action of chemical and abrasive media. All this should be considered when justifying effective ways to improve the performance of functional units, including manipulators of logging machines, and achieved through regulated directional control of the properties of surface layers in the design and manufacture of friction-contacting parts. The paper substantiates the need to create scientific and engineering foundations for improving the performance of functional units and working bodies of machines, as well as achieving the required performance, durability and reliability. For this purpose, the tasks of further research aimed at obtaining information, the absence of which makes it impossible to create domestic import-substituting equipment, are clarified.

For citation: Pamfilov E.A., Kapustin V.V., Pilyushina G.A., Sheveleva E.V. Improving the Performance of Working Bodies and Tribosystems of Harvester Technological Equipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 6, pp. 135–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149

Keywords: working capacity, tribotechnical units, dynamic loads, wear, logging machines, swivel joint, manipulator.

Введение

В современных условиях развития лесного комплекса России эффективное решение многих его проблем невозможно без использования отечественной конкурентоспособной лесозаготовительной техники. Отсутствие ее производства в РФ ставит под вопрос обеспечение национальной безопасности страны, поскольку на российском рынке доминируют зарубежные компании, на долю которых приходится большая часть используемой техники для сортиментной заготовки древесины. При этом необходимо иметь в виду, что объем рынка таких машин в России в 2019–2020 гг. составил 330–420 форвардеров, 165–300 харвестеров, 30–40 валочно-пакетирующих машин и примерно столько же скиддеров. Таким образом, наша лесозаготовительная промышленность находится практически в полной зависимости от зарубежных производителей [2, 17, 25, 31, 38, 46–50, 52]. В их руках и сервисное обслуживание поставляемой техники, исключительно прибыльный бизнес, способствующий значительному оттоку средств из нашей страны. Поэтому естественным является отсутствие у зарубежных производителей заинтересованности в открытии производственных площадок или совместных производств лесозаготовительных машин. Данная ситуация привела к тому, что на российском рынке нет сильных отечественных производителей, готовых участвовать в процессах импортозамещения [12, 16, 17, 33].

В последнее время место такого производителя в России начинает занимать белорусский холдинг «Амкодор» [28, 43], что, однако, вряд ли политически и экономически целесообразно: в любом случае нужно иметь отечественного производителя лесозаготовительной техники [16, 18, 29].

Для этого необходимо располагать разработанными в России перспективными конструкциями машин для заготовки и переработки древесины, позволяющими обеспечить существенное увеличение производительности техники и качества получаемой продукции. Важным аспектом при этом является до-

стижение в ближайшее время повышенной надежности и работоспособности триботехнических узлов лесозаготовительных машин и оборудования.

Возможность реализации такого подхода обусловлена появлением реальной перспективы привлечения к производству указанной техники предприятий военно-промышленного комплекса в связи с их ожидаемой конверсией. Такие предприятия обладают требуемой высокотехнологичной базой, кадрами и опытом создания современной сложной техники.

Однако для успешного решения данной задачи помимо производственной базы необходимо располагать соответствующими научно-инженерными разработками, не имея которых невозможно обеспечить создание техники, востребованной как на отечественном, так и на зарубежном рынках. Поэтому требуется выполнение этих разработок, прежде всего в области повышения работоспособности основных узлов и рабочих органов рассматриваемых машин и обеспечение за счет этого их высокой производительности, долговечности и безотказности.

Цель работы – выработка путей повышения работоспособности рабочих органов и деталей трибосистем многооперационных лесозаготовительных машин за счет совершенствования технологий упрочняющей обработки и более эффективного конструктивного исполнения ответственных узлов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований являются ответственные узлы лесозаготовительных машин и их рабочие органы, работоспособность которых недостаточна по причине несовершенства конструкций и технологии изготовления, вследствие чего они не могут быть использованы в полной мере при создании отечественных конкурентоспособных образцов современной лесозаготовительной техники. К таким узлам относится, прежде всего, главный рабочий орган лесозаготовительных машин – манипулятор с захватно-срезающим устройством. С помощью манипулятора выполняется широкий перечень технологических операций, начиная с валки древесины и заканчивая погрузкой полученных сортиментов. Сюда же входят устройства гидропривода, содержащие трубопроводы и их многочисленные соединения [2].

В процессе работы отдельные технологические элементы рассматриваемой машины и ее рабочие органы выполняют согласованные движения друг относительно друга. В частности, стрела и рукоять совершают относительный поворот с использованием шарнирных соединений. Поворотный ротатор, закрепленный на конце рукояти, через скобу наклонного устройства обеспечивает перемещение головки из вертикального в горизонтальное положение. Привод всех механизмов манипуляторов гидравлический. Эти перемещения приводят к интенсивному изнашиванию поверхностей подвижных деталей, составляющих манипулятор.

Харвестерная головка также содержит большое количество взаимно подвижных деталей. Прежде всего, это захватные рычаги, на концах которых смонтированы гидравлические моторы, приводящие во вращение подающие валцы протаскивающего механизма. В процессе работы они прижимаются к дереву и удерживают его в силовом контуре при выполнении технологических опера-

ций. Головка оснащена подвижными и неподвижными сучкорезными ножами. Боковые подвижные ножи имеют индивидуальный привод от гидроцилиндров. На нижней части рамы размещается срезающее устройство – пильный механизм, предназначенный для валки и раскряжевки дерева на сортименты после обрезки сучьев [32].

Как видно, в конструкции лесозаготовительных машин преобладают функциональные узлы, относящиеся к триботехническим, поскольку в них реализуются процессы трения, а наиболее частыми причинами отказов являются достижение недопустимых величин износа, а также потеря герметичности гидравлических соединений, затупление сучкорезных ножей, пильных цепей, шарнирных соединений и т. д. Работоспособность этих узлов в значительной степени определяет технический уровень машины [19, 21, 34, 35, 39, 44].

Совокупности функциональных узлов, причины их отказов и перечень параметров, определяющих работоспособность, отражены на схеме, представленной на рисунке. Разнообразие видов и механизмов изнашивания деталей рассматриваемых узлов машин предопределяет сложность выбора методик их изучения. Перспективные методы и техника для выполнения экспериментальных исследований рассматриваются в литературно-патентных источниках [5, 7–9, 11, 13–15, 36, 40, 41, 47, 51, 53]. Многое из предложенного авторами данных работ может быть успешно использовано при разработке путей повышения триботехнических характеристик выбранных объектов исследования. Однако в ряде случаев могут потребоваться и новые методические разработки, например в части более широкого использования компьютерного моделирования [7–9].



Основные триботехнические узлы и рабочие органы лесозаготовительных машин

Basic tribotechnical units and working bodies of logging machines

Выполненными ранее исследованиями [21, 26, 27, 34, 35] установлено, что рассматриваемые триботехнические узлы и составляющие их детали эксплуатируются в условиях приложения высоких ударных, циклических и вибрационных нагрузок в жестких природно-производственных условиях, таких как сложный рельеф местности, неудовлетворительное состояние грунтов, климатические условия, включающие широкий температурный диапазон, вплоть до -40° , повышенную влажность и т. д.

Результаты исследования и их обсуждение

Преобладающие механизмы изнашивания деталей основных триботехнических узлов лесозаготовительных машин, характерные условия его протекания, а также факторы, способствующие интенсификации поверхностного разрушения, приведены в таблице.

№*	Наименование функционального узла	Характерные эксплуатационные условия, определяющие работоспособность	Прогнозируемые преобладающие механизмы изнашивания	Воздействие, усугубляющее процессы изнашивания
1	Шарнирные соединения	Динамическое нагружение; высокие пиковые давления; граничная смазка [35]	Адгезионно-механическое изнашивание, схватывание [39]	Поверхностное деформирование; высокая локальная температура
2	Разъемные соединения гидросистемы	Вибрации, циклические контактные давления [24]	Фреттинг-коррозия [42]	Пластическое деформирование; потеря герметичности
3	Исполнительные устройства гидропривода	Динамическое нагружение; абразивное действие; граничная смазка; кавитация [44]	Усталостное адгезионно-механическое и кавитационное изнашивание [44]	Микрорезание абразивными частицами; повышенная температура, пенообразование рабочей жидкости [40, 41]
4	Протаскивающие вальцовые механизмы	Циклические и ударные нагрузки; действие химически активных сред и абразива [19, 22]	Коррозионно-механическое и абразивное изнашивание [20]	Изменение геометрии шипов; выкрашивание и сколы [22]
5	Сучкорезные ножи	Многоосное напряжение; ударные нагрузки; действие химически активных сред, абразива и микроорганизмов [32]	Коррозионно-механическое и абразивное изнашивание [34]	Антиплоская деформация режущего лезвия; электрохимическое воздействие; микровыкрашивание
6	Пильный аппарат	Ударные и вибрационные нагрузки; действие химически активных сред, абразива и микроорганизмов	Усталостное, коррозионно-механическое и абразивное изнашивание [21]	Выкрашивание, сколы; растяжение пильных цепей; недостаток смазки [21]

* № соответствует номеру на схеме.

С точки зрения оценки условий нагружения подвижных соединений шарнирных узлов манипуляторов можно отметить, что наиболее тяжелым является момент, когда манипулятор начинает технологические перемещения. В это время он воспринимает максимальную нагрузку, при действии которой контактирующие поверхности должны преодолевать трение покоя, по величине гораздо большее, чем трение движения. Такая ситуация усугубляется и тем, что и условия смазывания в это время наиболее неблагоприятные. Это способствует схватыванию. В результате отделяются достаточно крупные продукты изнашивания, и становится возможным объемное разрушение деталей трибоузлов [3, 35, 39].

Характер нагружения других фрикционных соединений и его величина определяются режимами эксплуатации: массой заготавливаемых деревьев, скоростью технологических перемещений, силами трения и инерции. При этом повышенные нагрузки реализуются при выполнении наиболее энергоемких операций, занимающих 30...40 % времени работы машин. Такими операциями являются наведение рабочего органа на дерево, его срезание и перенос, а также погрузка лесоматериалов. Кроме того, значительные нагрузки возникают при пуске или торможении манипулятора, они сопровождаются быстрым изменением сил, действующих на рабочий орган при освобождении его от обрабатываемого дерева.

Существенную роль в протекании изнашивания, помимо высокого уровня динамического нагружения рассматриваемых деталей, играют и другие негативные факторы, такие как попадание абразива в зону фрикционного взаимодействия, химическое действие активных сред и т. д. Совокупности таких условий отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах материалов деталей триботехнических узлов и применяемых рабочих сред – гидравлических жидкостей и смазок [4, 30, 36, 40, 41].

Необходимо также иметь в виду, что при низких температурах повышается вязкость смазок, снижаются их смазочные свойства, а это негативно влияет на процессы трения и изнашивания деталей триботехнических узлов. Поэтому при выработке путей повышения износостойкости одновременно должны оптимизироваться и применяемые при работе смазочно-технологические материалы, а также способы их подачи в зоны технологических воздействий [3, 6, 10, 23, 30]. Кроме того, необходимо принимать во внимание вероятность существенного охрупчивания применяемых конструкционных материалов трущихся пар деталей при действии низких температур. Следствием становится снижение ударной вязкости, что также интенсифицирует процесс изнашивания контактных поверхностей деталей рассматриваемых узлов, особенно при действии ударно-динамических нагрузок. Для минимизации трения перспективно использование антифрикционных покрытий и твердых смазок, обеспечивающих хороший смазочный эффект и стабильно низкий коэффициент трения. Для шарнирных соединений целесообразно применение поляризованного графита и дисульфида молибдена [6, 10, 23].

В летний период смазочный материал нагревается, его функциональные свойства, включая вязкость, снижаются. В результате происходит вытекание смазки из зоны трения, что также отрицательно сказывается на процессах трения, смазки и охлаждения в триботехнических соединениях. Кроме того, коле-

бание эксплуатационных температур приводит к температурным деформациям деталей и изменению характера их функционального соединения. Вследствие этого из-за уменьшения рабочих зазоров возрастает вероятность схватывания между контактирующими деталями. Появляются микроочаги сваривания сопрягаемых поверхностей, что приводит к интенсификации изнашивания и преждевременному отказу трибосопряжений. При колебаниях величин зазоров также нарушается процесс образования эффективно работающего масляного клина. При этом абразивные частицы, попадая в зазоры триботехнических соединений, деформируют и царапают функциональные поверхности контактирующих деталей, приводя к повышенному износу [36, 40, 41].

Нередкой является и работа триботехнических узлов в условиях большой запыленности, загрязненности, наличия активных сред и повышенной влажности. Существенное негативное влияние на узлы трения машин оказывают особые условия изнашивания их деталей при технологическом контактировании с обрабатываемой древесиной и продуктами ее деструкции. Это способствует активизации коррозионно-механического и водородного изнашивания [20, 37, 45, 47, 51, 53].

Отмеченные условия эксплуатации практически в полной мере воспринимаются и триботехническими узлами рассматриваемых машин, в т. ч. деталями шарнирных соединений. Они в процессе эксплуатации работают в режиме реверсивного возвратно-вращательного движения. Такой характер движения способствует росту износа, повышая его в 2 раза и более по сравнению с трением при одностороннем вращении [35]. Это связано с быстрой переменной направления скоростей перемещения и изменением величины и знака сдвиговых деформаций и действующих напряжений. Вследствие этого сила трения увеличивается в широких пределах, проявляется наклеп и перестраиваются дислокационные поля в поверхностных микрообъемах материала. Возрастает дефектность структуры используемых материалов, увеличивается свободная поверхностная энергия, а также интенсифицируются электрофизические и химические процессы на поверхностях трения и в контактной зоне.

Перспективным для повышения работоспособности шарнирных соединений является замена возвратно-вращательного трения односторонним. Это может быть достигнуто за счет использования храповых или иных механизмов формирования трения [35].

В шарнирных соединениях манипуляторов фрикционно-контактирующие поверхности деталей работают преимущественно в условиях граничной смазки. Изредка проявляется полусухое трение, особенно в начале перемещения нагруженного манипулятора, и редко формируется достаточно устойчивый масляный клин. Эксплуатация подшипников скольжения при полусухом трении и даже при граничной смазке приводит к значительному износу поверхностей, а повышенные величины износа способствуют нарушению кинематической точности конструкции. Это вызывает дополнительные динамические нагрузки, удары, вибрации и, как следствие, зачастую становится основной причиной разрушения деталей шарнирных соединений. Для стабилизации трения в данных условиях целесообразно введение в зону трения твердосмазочных материалов или использование для изготовления подшипников скольжения композиций, имеющих такие материалы в своей структуре.

Для снижения динамических нагрузок и вибраций, негативно влияющих на работоспособность манипуляторов, перспективным является применение демпферных устройств, промежуточных демпфирующих материалов, а также материалов с внутрискруктурными виброгасящими составляющими [19, 30, 35]. Кроме того, для повышения триботехнических показателей целесообразно использование регулярного микрорельефа и остаточных напряжений сжатия на функциональных поверхностях подвижных деталей [39, 44]. В неподвижных соединениях шарнирного узла возможно создание промежуточных покрытий, обеспечивающих относительные микроперемещения в стыках.

Вместе с тем имеющейся в настоящее время информации, особенно прикладной направленности, недостаточно для повышения работоспособности и создания перспективных образцов лесозаготовительных машин. Кроме того, сведения либо находятся в конфиденциальных источниках фирм производителей, либо защищены действующими патентами. Это делает необходимым расширение исследований в части выработки новых перспективных путей повышения работоспособности шарнирных соединений манипуляторов, пильных устройств, подвижных деталей и соединительно-герметизирующих устройств гидросистем, вальцов, подающих заготовку в зону обработки, ножей для срезания сучьев и др.

При этом следует принимать во внимание, что при изнашивании подающих вальцов, сучкорезных ножей и пильных цепей происходит деформационное и режущее взаимодействие их рабочих зон непосредственно с заготавливаемой древесиной. Это обуславливает увеличение числа физико-химических факторов, определяемых действием древесного вещества на реализацию механизма изнашивания и его интенсивность. Закономерности такого влияния установлены в работах [21, 22, 34].

Особый характер изнашивания наблюдается при взаимодействии поверхностей деталей триботехнических узлов гидравлических систем машин. К ним прежде всего относятся герметизирующие устройства гидросистем и используемых в них подшипников скольжения [30, 36, 40, 41, 44].

Следует отметить и необходимость существенного расширения исследований в части конструкторско-технологического обеспечения износостойкости деталей узлов рассматриваемых машин. При этом целесообразным является использование результатов ранее выполненных в указанном направлении работ [1, 21, 22, 24, 27, 35, 42]: полученные результаты могут служить в качестве отправных и базовых данных для формирования последующих исследовательских программ в части поиска научно-обоснованных путей повышения эффективности функционирования рассматриваемых объектов. При этом перспективные разработки должны быть ориентированы на гарантированное повышение эксплуатационного ресурса и технико-экономической эффективности работы функциональных узлов машин посредством создания и использования новых конструкционных материалов, совершенствования упрочняющих технологий и глубокой модернизации конструкций ответственных узлов.

Заключение

В целях эффективного развития российской лесозаготовительной отрасли, снижения ее зависимости от зарубежных производителей техники и действия возможных санкций должны быть созданы научно-технические основы для последующей инженерной разработки отечественных высокотехнологичных лесозаготовительных машин и обеспечения их серийного производства. Для этого необходимы систематизация имеющихся научных данных и выполнение дальнейших исследований в области повышения долговечности триботехнических узлов лесозаготовительных машин по следующим направлениям.

1. Создание конструкций триботехнических узлов с использованием материалов, обладающих повышенными теплопроводностью и теплоемкостью; формирование регулярного микрорельефа на контактирующих поверхностях и остаточных напряжений сжатия в функциональных слоях деталей.

2. Разработка новых антифрикционных материалов, покрытий и промежуточных сред, содержащих антифрикционные составляющие (например, графит, дисульфид молибдена и др.), для снижения коэффициента трения.

3. Использование демпферных устройств и применение подшипниковых материалов с внутрискрутурными виброгасящими составляющими в целях уменьшения уровня динамических нагрузок и вибраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абразумов В.В. Износостойкость режущего инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2009. 34 с. Abrazumov V.V. *Wear Resistance of the Cutting Tool When Processing Wood-Based Composite Materials*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 34 p.

2. Бартенева И.М., Емтыль З.К., Татаринова А.П., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: моногр. М.: Флинта: Наука, 2011. 408 с. Barteneva I.M., Emtyl' Z.K., Tatarenko A.P., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Hydromanipulators and Forestry Technological Equipment*: Monograph. Moscow, Flinta: Nauka Publ., 2011. 408 p.

3. Буяновский И.А. Граничная смазка // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 170–186. Buyanovskiy I.A. *Boundary Lubrication. Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU, 2019. pp. 170–186.

4. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). М.: МСХА, 2002. 632 с. Garkunov D.N. *Tribotechnics (Design, Manufacture and Operation of Machines)*. Moscow, MSKhA Publ., 2002. 632 p.

5. Гриб В.В., Лазарев Г.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1968. 141 с. Grib V.V., Lazarev G.E. *Laboratory Tests of Materials for Friction and Wear*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 141 p.

6. Гришин Н.Н. Пластичные смазочные материалы (пластичные смазки) // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 335–358. Grishin N.N. *Plastic Lubricants. Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 335–358.

7. Евельсон Л.И., Памфилов Е.А. Оптимизация узлов трения машин с учетом неопределенности информации в исходных данных // Трение и износ. 2006. Т. 27, № 2. С. 191–195. Evelson L.I., Pamfilov E.A. *Optimization of Friction Units of Machines*

with Consideration of the Information Uncertainty in Initial Data. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2006, no. 2, pp. 191–195.

8. Евельсон Л.И., Захаров С.М., Памфилов Е.А., Рафаловская М.Я. Компьютерная технология анализа и синтеза узлов трения на основе баз данных и экспертных систем // Трение и износ. 2000. Т. 21, № 4. С. 380–385. Evelson L.I., Zakharov S.M., Pamfilov E.A., Rafalovskaya M.Y. PC-Process of Analyzing and Synthesizing Friction Units Using Databases and Expert Systems. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2000, no. 4, pp. 380–385.

9. Захаров С.М. Компьютерная трибология // Трение и износ. 1993. № 1. С. 98–106. Zaharov S.M. Computer Tribology. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 1993, no. 1, pp. 98–106.

10. Золотов В.А. Присадки (добавки) к смазочным материалам // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 378–389. Zolotov V.A. Improvers (Additives) to Lubricants. *Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 378–389.

11. Карасик И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира / под ред. проф. В.С. Кершенбаума. М.: Центр «Наука и техника», 1993. 325 с. Karasik I.I. *Methods of Tribological Tests in the National Standards of the Countries of the World*. Ed. by Prof. V.S. Kershenbaum. Moscow, Tsentr “Nauka i tekhnika” Publ., 1993. 325 p.

12. Коваленко Н.В., Чекунов А.С. Импортозамещение в отечественном сельхозмашиностроении как фактор повышения конкурентоспособности отрасли // Изв. ДВФУ. Экономика и управление. 2019. № 3. С. 67–88. Kovalenko N.V., Chekunov A.S. Import Substitution in the Domestic Agricultural Machinery as a Factor in Increasing the Competitiveness of the Industry. *Izvestiya Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Ekonomika i upravleniye* [The bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management], 2019, no. 3, pp. 67–88. DOI: <https://doi.org/10.24866/2311-2271/2019-3/67-88>

13. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справ. / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с. Kombalov V.S. *Methods and Tools for Friction and Wear Testing of Structural and Lubricating Materials*: Handbook. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 384 p.

14. Куksenova Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ: справ. изд. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 152 с. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G., Rybakova L.M. *Methods of Testing for Friction and Wear*. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2001. 152 p.

15. Мирошниченко И.П. Перспективные оптические измерительные средства и технологии для контроля качества конструкционных материалов // Качество и жизнь. 2014. № 5. С. 438–446. Miroshnichenko I.P. Perspective Optical Measuring Tools and Technologies for Quality Control of Structural Materials. *Kachestvo i zhizn'* [Quality and life], 2014, no. 5, pp. 438–446.

16. Михайлов А. Лесные тренды. Лесопромышленный комплекс получит новую стратегию развития // Рос. газ. Экономика Северо-Запада. 2020. № 140(8194). Режим доступа: <https://rg.ru/2020/06/30/reg-szfo/lesopromyshlennyj-kompleks-poluchit-novuyu-strategiyu-razvitiia.html> (дата обращения: 30.06.20). Mikhaylov A. Forest Trends. The Timber Industry will Receive a New Development Strategy. *Rossiyskaya gazeta. Ekonomika Severo-Zapada*, 2020, no. 140(8194).

17. Национальный каталог техники «Стройдормаш». 2020. Вып. № 29. Режим доступа: http://www.sdm-katalog.ru/pdf/kat_stroydor_29_2020.pdf (дата обращения: 08.11.21). *National Catalogue of Equipment “Stroydormash”*. 2020, iss. 29.

18. О возможных направлениях выхода из кризиса в развитии отечественного лесного машиностроения: протокол заседания Комитета при Бюро ЦС по тракторному, сельскохозяйственному, лесозаготовительному, коммунальному и дорожно-строительному машиностроению / Общерос. обществ. организация «Союз машиностроителей России». М., 2014. 12 с. Режим доступа: <http://soyuzmash.ru/docs/prot-ktm-181114.pdf> (дата обращения: 08.11.21). On the Feasible Directions of Overcoming the Crisis in the Development of Russian Forest Mechanical Engineering. *All-Russian Public Organization "Russian Engineering Union". Committee under the Bureau of the Central Council for Tractor, Agricultural, Logging, Communal and Road Construction Mechanical Engineering. Protocol of the Committee Meeting.* Moscow, 2014. 12 p.

19. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А. Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 5. С. 129–141. Pamfilov E.A., Pilyushina G.A. Possibilities and Prospective Ways to Increase Working Capacity of Forest Sector Machines and Equipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 5, pp. 129–141. URL: <http://lesnozhurnal.ru/upload/iblock/716/le1.pdf>

20. Памфилов Е.А., Прозоров Я.С. К вопросу моделирования коррозионно-механического изнашивания // Трение и износ. 2012. Т. 33, № 3. С. 284–297. Pamfilov E.A., Prozorov Y.S. On the Modeling of Mechanochemical Wear. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2012, vol. 33, no. 3, pp. 284–297.

21. Памфилов Е.А., Шевелева Е.В. Особенности исследования изнашивания режущих инструментов для переработки древесных материалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 89–103. Pamfilov E.A., Sheveleva E.V. A Study of Cutter Wear Rate for Wood-Based Materials Processing. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 6, pp. 89–103. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.89>

22. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Шевелева Е.В., Прозоров Я.С., Пыриков П.Г. Повышение работоспособности подающих устройств деревоперерабатывающего оборудования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 2. С. 102–110. Pamfilov E.A., Pilyushina G.A., Sheveleva E.V., Prozorov Ya.S., Pyrikov P.G. Improving the Feeder's Working Capacity of Timber Processing Equipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 2, pp. 102–110. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.102>

23. Паренаго О.П., Кузьмина Г.Н. Трибоактивные присадки к смазочным материалам // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 390–397. Parenago O.P., Kuz'mina G.N. Triboactive Improvers for Lubricants. *Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 390–397.

24. Патент 2499171 РФ, МПК F16J 15/00. Способ изготовления неподвижных разъемных соединений: № 2011148194/06: заявл.25.11.2011; опубл. 20.11.2013 / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков П.Г., С.В. Тяпин. Pamfilov E.A., Pilyushina G.A., Pyrikov P.G., Tjapin S.V. *Method to Manufacture Fixed Detachable Joints*. Patent RF no. RU 2499171 C2, 2013.

25. Пискунов М.А. Особенности российского рынка лесозаготовительной техники // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 132–147. Piskunov M.A. Features of the Harvesting and Logging Equipment Market in Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 6, pp. 132–147. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-132-147>

26. Пошарников Ф.В., Усиков А.В. Особенности работы узлов трения в лесопромышленном оборудовании // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение. Воронеж: ВГЛТА, 2009. Вып. 4. С. 95–100. Posharnikov F.V. Features of the Work of Friction Units in Timber-Processing Equipment. *Nature Management: Resources and Technical Support*. Voronezh, VGLTA Publ., 2009, iss. 4, pp. 95–100.

27. Прозоров Я.С. Повышение эффективности производства древесной стружки на основе увеличения долговечности применяемого оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2016. 17 с. Prozorov Ya.S. *Improving the Efficiency of Wood Chip Production Based on Enhancing the Durability of the Equipment Used*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2016. 17 p.

28. Развитие лесного машиностроения в Республике Беларусь и Российской Федерации // Интернет-портал СНГ. Режим доступа: https://studwood.ru/1002319/tovarovedenie/razvitie_lesnogo_mashinostroeniya_v_respublike_bielarus_i_rossiyskoy_federatsii (дата обращения: 10.08.20). Development of Forestry Machine-Building in the Republic of Belarus and the Russian Federation. *CIS Internet Portal*. Moscow, 2015.

29. Распоряжение Правительства РФ от 20 сент. 2018 г. № 1989-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/551187885> (дата обращения: 10.08.20). *The Decree of the Government of the Russian Federation of September 20, 2018 No. 1989-r "On Approval of the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030"*.

30. Рождественский Ю.В., Задорожная Е.В. Динамически нагруженные подшипники скольжения // Трибология. Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 235–256. Rozhdestvenskiy Yu.V. Dynamically Loaded Sliding Bearings. *Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ufa, USATU Publ., 2019, pp. 235–256.

31. Российский статистический ежегодник. 2019. М.: Росстат, 2019. 708 с. *Russian Statistical Yearbook 2019*. Moscow, Rosstat Publ., 2019. 708 p.

32. Рукмоиных К.П., Ведерников С.В. Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127. Rukmoynikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimiting Knife. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2019, no. 1, pp. 120–127. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.120>

33. Сборник материалов Заседания Комитета при Бюро ЦС по тракторному, сельскохозяйственному, лесозаготовительному, коммунальному и дорожно-строительному машиностроению Союза машиностроителей России. М., 2014. 120 с. Режим доступа: <http://www.soyuzmash.ru/docs/ktm/sm250214.pdf> (дата обращения: 10.08.20). *Proceedings of the Meeting of the Committee under the Bureau of the Central Council for Tractor, Agricultural, Logging, Communal and Road Construction Mechanical Engineering of the Russian Engineering Union*. Moscow, 2014. 120 p.

34. Селиверстов А.А., Симонова И.В., Александров А.А. Исследование состояния геометрии формы и заточки сучкорезных ножей харвестеров // Тр. лесинж. фак. ПетрГУ. 2010. Т. 8. С. 128–132. Seliverstov A.A., Simonova I.V., Aleksandrov A.A. Geometry of Form and Filing Angle of Harvester Head Knives. *Trudy lesoinzhenernernogo fakul'teta PetrGU [Resources and Technology]*, 2010, vol. 8, pp. 128–132. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2010.1785>

35. Серебрянский А.И., Афоничев Д.Н., Ворохобин А.В. Повышение износостойкости шарнирных соединений манипуляторов при ремонте // Вестн. ВГАУ. 2012. № 2(33). С. 107–111. Serebryansky A.I., Afonichev D.N., Vorokhobin A.V. Increasing the Wear Resistance of Manipulator Pin Joints during Repairs. *Zhurnal Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Vestnik of Voronezh State Agrarian University]*, 2012, vol. 2(33), pp. 107–111.

36. Современная трибология: итоги и перспективы / Э.Д. Браун и др.; отв. ред. К.В. Фролов. М.: ЛКИ, 2008. 480 с. Braun E.D. et al. *Modern Tribology: Results and Prospects*. Ed. by K.V. Frolov. Moscow, LKI Publ., 2008. 480 p.

37. Сорокин Г.М., Ефремов А.П., Саакян Л.С. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов. М.: Нефть и газ, 2002. 424 с. Sorokin G.M., Efremov A.P., Saakyan L.S. *Corrosion-Mechanical Wear of Steels and Alloys*. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2002. 424 p.
38. Стрельцов Э. Импорт лесозаготовительной техники в Россию // Основные средства. 2011. № 2. С. 80–82. Strel'tsov E.K. Import of Logging Equipment to Russia. *Osnovnyye sredstva*, 2011, no. 2, pp. 80–82.
39. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко А.О., Прокофьев А.Н., Тотай А.В., Федонин О.Н. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 448 с. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko A.O. Prokof'yev A.N., Totay A.V., Fedonin O.N. *Technological Support and Improvement of Operational Properties of Parts and Their Connections*. Ed. by A.G. Suslov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006. 448 p.
40. Трибология: состояние и перспективы / под ред. И.В. Горячевой и М.А. Броновца. Уфа: УГАТУ, 2016. Т. 1. 435 с. *Tribology. State and Prospects*. Ed. by I.V. Goryacheva, M.A. Bronovets. Ufa, USATU Publ., 2016, vol. 1. 435 p.
41. Трибология: Состояние и перспективы. Т. 2. Смазка и смазочные материалы / под ред. С.М. Захарова и И.А. Буяновского. Уфа: УГАТУ, 2019. 504 с. *Tribology. State and Prospects*. Vol. 2. Lubrication and Lubricants. Ed. by S.M. Zakharov, I.A. Buyanovskiy. Ufa, USATU Publ., 2019. 504 p.
42. Тяпин С.В. Повышение работоспособности неподвижных соединений в гидросистемах деревоперерабатывающего оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 17 с. Tyarin S.V. *Improving the Performance of Fixed Joints in Hydraulic Systems of Wood Processing Equipment*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2012. 17 p.
43. Холдинг «Амкодор» выпустил 800-ю машину для лесопромышленного комплекса // Пресс-релизы ОАО «Амкодор». 25 ноября 2016. Режим доступа: https://www.tvr.by/news/ekonomika/amkador_vypustil_800_yu_mashinu_lesopromyshlennogo_kompleksa/ (дата обращения: 10.08.20). Amkodor Holding Released the 800th Machine for the Timber Industry. *Press Releases of JSC "Amkodor"*. November 25, 2016.
44. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. et al. *Fundamentals of Tribology (Friction, Wear, and Lubrication)*. Ed. by A.V. Chichinadze. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 664 p.
45. Darmawan W., Rahayu I.S., Tanaka C., Marchal R. Chemical and Mechanical Wearing of High Speed Steel and Tungsten Carbide Tools by Tropical Woods. *Journal of Tropical Forest Science*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 255–260.
46. *Global Forest Products. Facts and Figures 2016*. Rome, FAO, 2017. 18 p. Available at: www.fao.org/3/I7034EN/i7034en.pdf (accessed 10.08.20).
47. Jellesen M.S. *Tribocorrosion Properties of Metallic Materials and Effects of Metal Release*. Ph.D. Thesis. Lyngby, Denmark, DTU, 2007. 74 p.
48. Johnsen T. Finnish Forest Machine Market 2017 Compared to the Swedish. *Materials of the Website Forestry.com*. 2018. Available at: <https://www.forestry.com/editorial/finnish-forest-machine-market/> (accessed 10.08.20).
49. Johnsen T. Strong Forwarder Market in Sweden 2017. *Materials of the Website Forestry.com*. 2018. Available at: <https://www.forestry.com/editorial/strong-forwarder-market-sweden-2017/> (accessed 10.08.20).

50. Kairo I. John Deere Forestryn tilauskirja täyttyy venäläisillä tilauksilla [John Deere Forestry Oy Doubled Exports of Logging Equipment to Russia]. *Suomalais-Venäläinen kauppakamari (SVKK)* [Finnish-Russian Chamber of Commerce (FRTP)]. 2017. Available at: <https://www.svkk.fi/uutishuone/john-deere-forestry-tilauskirja-taytty-venalaisilla-tilauksilla/> (accessed 10.08.20).

51. Mischler S. Triboelectrochemical Techniques and Interpretation Methods in Tribocorrosion: A Comparative Evaluation. *Tribology International*, 2008, vol. 41, iss. 7, pp. 573–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.11.003>

52. *Ponsse Plc Annual Report for 2019*. 2019. 124 p. Available at: <https://pim.ponsse.com/media/ponsse-pim-api/api/content/getfile/16231567.pdf> (accessed 10.08.20).

53. *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*. Ed. by D. Landolt, S. Mischler. Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2011. 576 p.