

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/13>

УДК 630.51 : 624.014



Оценка надежности металлоконструкций подъемно-транспортных машин лесного комплекса с учетом усталостной прочности материала

Алина В. Попикова¹✉, poalinka@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

Андрей В. Колюхов¹, akoniukhov@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1828-3673>

Сергей К. Попиков², sergpopikov@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

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

²ООО "ИКПАД" – Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, 394055, Российская Федерация

В настоящее время в лесном комплексе условия работы подъемно-транспортных машин (ПТМ): самоходных лесопогрузчиков манипуляторного типа характеризуются интенсивными технологическими нагрузками, высокими скоростями подъема и перемещения грузов, при этом не всегда обеспечиваются требуемые ресурсные характеристики. Долговечность ПТМ в основном определяется долговечностью несущей металлоконструкции. Приведен анализ различных методик оценки надежности металлоконструкций ПТМ с учетом усталостной прочности материала. Установлено, что одним из способов проектирования конструкций с минимальной массой является повышение расчетных сопротивлений материалов, однако коэффициент запаса является неудобным для оценивания готовности конструкции к эксплуатации. Необходимо создание более универсального критерия – вероятности отказа. Целью работы является разработка методики и алгоритма количественной оценки вероятности безопасной работы металлоконструкции с учетом снижения несущей способности. Для исследования показателей усталостной прочности подкрановых балок машин лесного комплекса и факторов, оказывающих на нее влияние, рассмотрен кран грузоподъемности 32/5 т. Произведен расчет на усталостную прочность металлоконструкции крана. Количество циклов нагружения при режиме работы 3К по истечении срока 5 лет составляет $N = 3,0 \cdot 10^5$. При используемом материале сталь С255 (ГОСТ 27772-88) с временным сопротивлением $R_{un} = 380$ МПа, и расчетным сопротивлением усталости R_v , принимаемым в зависимости от временного сопротивления стали R_{un} , следовательно, $R_v = 120$ МПа, усталостная прочность составила для различных временных промежутков 5-50 лет от 328,88 МПа до 167,98 МПа. Получены расчетные зависимости коэффициента безопасности от времени эксплуатации крана грузоподъемностью 32/5 т в зависимости от режима работы крана от 7,9 до 2,01. Полученные результаты могут использоваться при проектировании металлоконструкций ПТМ лесного комплекса, а также в строительстве и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: лесные машины, металлоконструкция, динамические нагрузки, краны, манипуляторы, прочность, усталость, надежность

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: Авторы выражают признательность научному руководителю профессору кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ, доктору технических наук Попикову Петру Ивановичу за оказанную помощь в подготовке материалов. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: Авторы статьи заявляют об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке и написании рукописи.

Для цитирования: Попикова А. В. Оценка надежности металлоконструкций подъемно-транспортных машин лесного комплекса с учетом усталостной прочности материала / А. В. Попикова, А. В. Конюхов, С. К. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 194–208. – Библиогр.: с. 204–207 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/13>.

Поступила 06.02.2023. *Пересмотрена* 12.03.2023. *Принята* 21.03.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023.

Article

Assessment of the reliability of metal structures of lifting and transport machines of the forest complex, taking into account the fatigue strength of the material

Alina V. Popikova¹✉, poalinka@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

Andrey V. Konyukhov¹, akoniukhov@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1828-3673>

Sergei K. Popikov², sergpopikov@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

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

²*Institute of Integrated Highway Design, LLC, Deputatsky str., Voronezh, 394055, Russian Federation*

Abstract

Currently, in the forest complex, the working conditions of lifting and transport machines (PTM): self-propelled manipulator-type loaders are characterized by intensive technological loads, high speeds of lifting and moving loads, while the required resource characteristics are not always provided. The durability of PTM is mainly determined by the durability of the supporting metal structure. The analysis of various methods for assessing the reliability of PTM metal structures, taking into account the fatigue strength of the material, is given. It is established that one of the ways of designing structures with a minimum mass is to increase the design resistances of materials, however, the margin factor is inconvenient for assessing the readiness of the structure for operation. It is necessary to create a more universal criterion – the probability of failure. The aim of the work is to develop a methodology and algorithm for quantifying the probability of safe operation of a metal structure, taking into account the reduction in load-bearing capacity. To study the fatigue strength indicators of crane beams of forest complex machines and the factors influencing it, a crane of various lifting capacities of 32/5 tons is considered. The calculation of the fatigue strength of the metal structure of the crane was made. The number of loading cycles in the 3K operating mode after the expiration of 5 years is $N = 3,0 \cdot 10^5$. With the material used, steel C255 [GOST 27772-88] with a temporary $R_{m0.2} = 380$ MPa and a calculated R_v fatigue resistance taken depending on the temporary resistance of steel $R_{m0.2}$, therefore, $R_v = 120$ MPa, fatigue strength was from 328.88 MPa to 167.98 MPa for various time intervals of 5-50 years. The calculated dependences of the safety coefficient on the operating time of the crane with a lifting capacity of 32/5 tons, depending on the operating mode of the crane from 7.9 to 2.01, are obtained. The results obtained can be used in the design of PTM metal structures also in construction and agriculture.

Keywords: *forest machines, metal structure, dynamic loads, cranes. manipulators, fatigue strength, reliability*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design of VSUFT Petr I. Popikov. Authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflicts of interest: The authors of this article have declared no personal, commercial, ideological, intellectual conflicts of interest in the preparation, writing and publication of this article.

For citation: Popikova A.V., Konyukhov A.V., Popikov S.K. (2023). Assessment of the reliability of metal structures of lifting and transport machines of the forest complex, taking into account the fatigue strength of the material // *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal]. – Vol. 13. – No. 1 (49). – pp. 194–208 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/13>.

Received 06.02.2023. *Revised* 12.03.2023. *Accepted* 21.03.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

Условия работы в лесном комплексе подъемно-транспортных машин (ПТМ): козловых, консольно-козловых, мостовых, башенных, кабельных и мостокабельных кранов, а также самоходных лесопогрузчиков манипуляторного типа в настоящее время характеризуются достаточно интенсивными технологическими нагрузками, высокими скоростями подъема и перемещения грузов, при этом не всегда обеспечиваются требуемые ресурсные характеристики. Лесозаготовительные машины манипуляторного типа подвергаются значительным циклическим или ударным нагрузкам в несколько раз превосходящие силы тяжести поднимаемых и перемещаемых деревьев.

В работе [1] отмечается, что при воздействие знакопеременных нагрузок на металлоконструкции ПТМ в процессе эксплуатации происходит деградация физико-механических свойств материала. По результатам исследований построены кинетические кривые, принадлежащие одному семейству, которые пересекают усталостную кривую в характерных точках. По этим графикам можно определить циклически одинаковые зоны для материалов близкими по значениям физико-механическими свойствами.

Анализ разрушений металлических конструкций мостовых кранов показал [2], что коэффициент прочности сварного шва зависит от способа сварки и конструкцией шва. Например, для таврового шва Т1 с конструктивным не проваром коэффициент прочности снижается до уровня

$\varphi=0,65$, а при полной проварке повышается до $\varphi=0,9-1,0$. Для крана группы режима 6К, 7К при 1,5 сменной работе установленная безотказная наработка на отказ составляет 3,5 года. На основании исследований составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок, которая позволит существенно поднять качество диагностики сварных соединений.

На основании проведенных исследований [3; 4] коррозионной и усталостной поврежденности металлоконструкции ПТМ установлена зависимость теоретического коэффициента концентрации напряжений от глубины дефекта, который принимает значения от 1,6 до 2,75. В результате коррозионного повреждения совместно с питтингообразованием в течение 12 лет эксплуатации предел выносливости для стали 09Г2С снизился с 277,87 МПа до 136,3 МПа.

Исследования [5; 6] российских и китайских ученых по применению фиброармированных полимерных материалов в металлических конструкциях для восстановления прочности при повреждениях коррозией, показали, что средняя несущая способность образцов до усиления составила 18,1 кН, а после усиления волокном – 24,1 кН, т.е. несущая способность образцов увеличилась на 33 %.

В статье [7] предлагается методика обеспечения безотказности металлоконструкций грузоподъемных кранов в течение срока службы, которая позволяет обосновать допусковое напряжение по критерию сопротивления усталости с заданной вероятностью.

Для обеспечения безотказности в течение срока в модели используются данные о прочностных характеристиках конструкционных сталей, технологии изготовления и конфигурации детали, данные о действующих нагрузках, циклической долговечности, требуемой производительности, стоимости изготовления и ремонта. Разработан алгоритм расчета допускаемого напряжения по критерию сопротивления усталости в зависимости от планируемого срока службы, технической производительности, вероятности безотказной работы.

При внедрении систем автоматизации инженерных расчетов (CAE-системы) на машиностроительных предприятиях [8] стало возможно проводить оценку поведения компьютерной 3-D модели объекта в различных условиях нагружения. Особенно актуальным является применение систем автоматизации в лесном машиностроении при оценке статической прочности шарнирных соединений элементов металлических конструкций гидроманипуляторов лесных машин.

Испытания образцов из стали [9] марки Ст3 на усталостную прочность проводили на специальном стенде с вращением образца от электродвигателя. К свободному концу образца прикладывали консольную нагрузку. Испытания образцов с диаметрами 5 мм и 13 мм, показали, что циклическая прочность для меньшего диаметра рабочей части образца (рис. 1, кривая 1) оказалась выше, т.е. для образца с диаметром 13 мм наклон кривой усталости увеличивается, а циклическая прочность уменьшается (рис. 1, кривая 2). Это объясняется тем, что зарождение усталостных трещин в образцах с меньшим диаметром полосы скольжения располагаются на большом расстоянии друг от друга, а при увеличении диаметра они расположены плотнее.

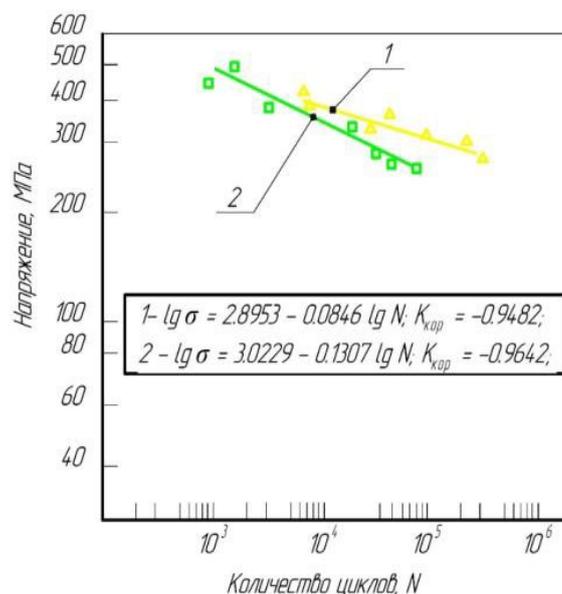


Рисунок 1. Зависимости напряжения усталости от количества циклов нагружения

1 - диаметр d=5 мм; 2 – диаметр d=13 мм – изгиб вращающегося образца

Figure 2. Dependences of fatigue stress on the number of loading cycles

1 - diameter d=5 мм; 2 – diameter d=13 мм – bending of a rotating sample

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

В работах [10;11;12] отмечается, что показатели несущей способности материалов полностью не определены, т.к. зависят от технологии изготовления и условий эксплуатации, поэтому применение традиционных вероятностных методов при наличии неполной статистической информации приводит к неверному результату. В этом случае рекомендуется применять методы теории возможностей. При увеличении нагружения область отказа возрастает, поэтому рекомендуется для оценки нижнего значения принимать верхнюю плотность распределения, а для оценки верхнего значения необходима нижняя плотность.

Однако, на практике важно знать наибольшее значение отказа и, соответственно, наименьшую более обеспеченную надежность элемента конструкции лесной машины.

В работе [13] разработаны методы и технические средства диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкции элементов гидропривода. Установлено, что при уменьшении коэффициента податливости элементов гидропривода рукоятки лесной машины Харвестер JD1479F, от 0,7 до 0,4 см⁵/кг приводит к уменьшению логарифмического декремента затуханий от 0,260 до 0,192, что влияет на увеличение длительности колебаний давления рабочей жидкости при переходных процессах и способствует усталостным разрушениям металлоконструкции манипулятора.

В работах [14;15] приведены результаты математического моделирования нагружения комбинированного лесного манипулятора. Получены графики зависимостей высоты и ширина поперечных сечений металлоконструкции стрелы и рукоятки от грузового момента и максимальный вылет стрелы. Моделирование стрелы выполнено в программе SOLIDWORKS. Материалом металлоконструкции манипулятора принята сталь 09Г2С [ГОСТ 19282-73] с допустимым напряжением $[\sigma] = 350$ МПа. Установлено, что наибольшие напряжения возникают в местах крепления проушины к стреле, при этом максимальное напряжение составляет 278 МПа, что не превышает допустимого.

В работе [16] для предложенных структурных и кинематических схем гидроманипуляторов разработаны математические модели и компьютерные программы. Проведено моделирование кинематики и динамики элементов металлоконструкции и установлено, что колебания давления в полостях гидроцилиндров эквивалентны знакопеременным нагрузкам в узлах крепления гидроцилиндров и самих металлоконструкциях, что при большой амплитуде колебаний сильно влияет на усталостную прочность металлоконструкций.

В работах представлены результаты исследований, направленных на снижение [17;18] максимальных колебаний давления рабочей жидкости в гидроприводах грузоподъемных механизмов манипуляторов путем обоснования и оптимизации параметров компоновки гидроцилиндров и демпфирующих устройств с учетом влияния податливости упругих элементов. Установлено, что упругость элементов опорной части может привести к

преждевременному выходу машины из рабочего состояния из-за усталостного разрушения некоторых ее элементов, поэтому жесткость опорной части должна быть более 100000 Н/м.

В работах [19; 20] на основе моделирования реализована новая концепция электрогидростатического привода с автоматическим управлением на гидравлических манипуляторах большой грузоподъемности. Замкнутый регулируемый гидропривод обеспечивает удержание груза, обработку перегрузок и компенсацию дифференциального потока, при этом уменьшается амплитуда раскачивания груза и снижение динамических нагрузок на металлоконструкцию манипулятора.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании ПТМ как в лесном комплексе, так и в строительстве и сельском хозяйстве.

Целью работы является разработка методики и алгоритма количественной оценки вероятности безопасной работы металлоконструкции ПТМ лесного комплекса с учетом снижения несущей способности, ввиду усталости материала.

Материалы и методы

При проектировании металлических конструкций и их элементов, непосредственно воспринимающих многократно действующие подвижные нагрузки с достаточным количеством циклов нагружения, которые приводят к явлению усталости, следует проводить расчет на усталость.

В данной работе для исследования показателей усталостной прочности подкрановых балок и факторов, оказывающих на нее влияние, рассмотрен кран грузоподъемности 32/5 т. Для изучения влияния количества циклов нагружения на значение усталостной прочности рассматриваются варианты режима работы крана: легкий 3К, средний 6К, тяжелый 8К.

Расчет на усталость по пункту 12.1.2 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81] производится по формуле

$$\frac{\sigma_{max}}{\alpha R_v \gamma_v} \leq 1,$$

R_v — расчетное сопротивление усталости, принимаемое в зависимости от временного сопротивления стали R_{un} ;

α – коэффициент, учитывающий число циклов нагружения N ,

при $N \geq 3,9 \cdot 10^6$, принимаем $\alpha = 0,77$;

при $N < 3,9 \cdot 10^6$, вычисляем по формуле:

$$\alpha = 0,064(N/10^6)^2 - 0,5(N/10^6) + 1,75.$$

γ_v – коэффициент, определяемый по таблице 36 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81] в зависимости от напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений.

Коэффициент асимметрии напряжений определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}},$$

где $\sigma_{max,min}$ – наибольшее и наименьшее по абсолютному значению напряжение в рассчитываемом сечении.

Расчет на усталость по пункту 11.3 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81] производится по формуле:

$$\sigma_{max} \leq \alpha R_u \gamma_u \left(\frac{N_b}{N} \right)^m,$$

где $N_b = 5 \cdot 10^5$ – базовое число циклов нагружения при расчете на малоцикловую прочность;

N – малоцикловая долговечность элемента металлической конструкции;

m, m_0 – параметры, характеризующие угол наклона кривой малоциклового усталости;

$$m = m_0 c;$$

m_0 – принимается по таблице 30 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81];

c – коэффициент, принимаемый по таблице 31 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81].

R_u – расчетное сопротивление по пределу временного сопротивления,

γ_u – коэффициент надежности, принимаемый 1,3 (пункт 4.3) [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81].

Разделение расчетных величин на две основные группы позволяет сформулировать задачу расчета конструкций на безопасность в виде требова-

ния о выполнении с некоторой достаточной вероятностью выполнения неравенства:

$$\tilde{R} - \tilde{Q} > 0,$$

где \tilde{R} – обобщенная прочность конструкции;

\tilde{Q} – обобщенная нагрузка.

$\tilde{R} - \tilde{Q}$ могут зависеть от ряда случайных и детерминированных величин, причем определение статистических свойств величин $\tilde{R} - \tilde{Q}$ производится самостоятельно, независимо одна от другой.

В общем случае прочность и нагрузка являются случайными функциями времени, в расчете понимаем $\tilde{R} - \tilde{Q}$, как случайные величины, обладающие определенными законами распределения.

При определении вероятности разрушения целесообразно ввести следующую величину:

$$\tilde{S} = \tilde{R} - \tilde{Q},$$

которую называют резервом прочности, при этом неравенство (1) принимает вид:

$$\tilde{S} > 0.$$

Для любых законов распределения \tilde{R} и \tilde{Q} получим:

$$\bar{\tilde{S}} = \bar{\tilde{R}} - \bar{\tilde{Q}};$$

$$\check{\tilde{S}} = \check{\tilde{R}} + \check{\tilde{Q}}$$

$$\hat{\tilde{S}} = \sqrt{\check{\tilde{R}} + \check{\tilde{Q}}},$$

где $\hat{\tilde{S}}$ – стандарт распределения резерва прочности, равный квадратному корню из дисперсии $\check{\tilde{S}}$.

Следовательно, вероятность разрушения возможно выразить в виде:

$$V = P_S(0) = P_S(\bar{\tilde{S}} - \bar{\tilde{S}}) = P_S(\bar{\tilde{S}} - \gamma \hat{\tilde{S}}),$$

где γ – характеристика безопасности.

Специалист в области механики А.Р. Ржаницын предложил считать, что характеристика безопасности γ представляет собой число стандартов S , которые укладываются в интервале от $S = 0$ до $S = \bar{\tilde{S}}$.

Таким образом, характеристику безопасности определяем по формуле

$$\gamma = \frac{\bar{\tilde{R}} - \bar{\tilde{Q}}}{\sqrt{\check{\tilde{R}} + \check{\tilde{Q}}}}$$

где $\bar{\tilde{R}}, \bar{\tilde{Q}}$ – математическое ожидание прочности и нагрузки;

$\check{\tilde{R}}, \check{\tilde{Q}}$ – дисперсия прочности и нагрузки.

Так как значение дисперсии есть квадрат среднеквадратического отклонения величин прочности и нагрузки, формулу для нахождения характеристики безопасности γ можно представить в виде:

$$\gamma = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

При выполнении нормального закона распределения \tilde{S} формула для нахождения вероятности разрушения (\uparrow) имеет вид:

$$V = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{0 - S}{\tilde{S}}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\gamma),$$

где Φ – интеграл вероятности Гаусса.

Интеграл вероятности Гаусса имеет вид:

$$\Phi(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\gamma \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

В сравнении с вероятностью разрушения V характеристика безопасности γ имеет преимущество, которое заключается в том, что оно выражается небольшим числом, обычно большим единицы, во время того, как V представляет собой очень малую дробь.

Интеграл вероятности Гаусса возможно определить с учетом того, что при определении значения $\Phi(\gamma)$ для отрицательных величин аргумента γ следует использовать следующее тождество:

$$\Phi(-\gamma) = 1 - \Phi(\gamma).$$

Значения $\Phi(\gamma) > 5$ можно считать очень большими, следовательно, соответствующими крайне малой вероятности разрушения.

Выдающийся ученый А.П. Сеницын, основоположник методики расчета строительных конструкций на надежность на основе теории риска, предложил оценивать безопасную работу строительной конструкции по так называемому показателю риск согласно формуле:

$$Q_f = \lg(V).$$

Доктор технических наук А.В. Перельмутер в своих работах так же использовал подобный принцип для нахождения логарифмического показателя уровня риска. Удобство использования данной величины заключается в том, что решена проблема трудности анализа значений уровня риска ввиду достаточно маленького значения.

Расчетный момент от вертикальной нагрузки следует определять по следующей формуле:

$$M_{max} = \alpha \sum F_{ki} \cdot y_i,$$

где α – коэффициент, который учитывает влияние собственного веса подкрановых конструкций и временной нагрузки на тормозной площадке [18];

y_i – ординаты линии влияния.

Для балок пролетом 6 м принимаем $\alpha = 1,03$; для пролета 12 м $\alpha = 1,05$.

Таким образом, наибольшее напряжение определяем по формуле:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x^H},$$

где W_x^H – момент сопротивления сечения для нижнего волокна.

Результаты исследования

При расчете металлоконструкции на усталость необходимы данные о количестве циклов нагружения кранов за расчетный период. Количество циклов нагружения для крана грузоподъемностью 32/5 т при режиме работы 3К по истечению срока 5 лет составляет $N = 3,0 \cdot 10^5$.

Так как $N = 3,0 \cdot 10^5 < 3,9 \cdot 10^6 \alpha = 0,1,6$.

Используемый материал сталь С255 с временным сопротивлением $R_{un} = 380$ МПа (таблица В.3[14]), следовательно, $R_v = 120$ МПа.

Так как конструкция линейно-деформируема, а так же схема нагружения не изменяется, то напряжения прямо пропорциональны интенсивности нагрузки, следовательно, при нахождении коэффициента асимметрии можно перейти от соотношения напряжений к аналогичному соотношению нагрузок.

К минимально возможной интенсивности нагрузки относится постоянная нагрузка, которая включает в себя собственный вес подкрановой балки, а так же тормозной балки и кранового рельса. Принимая, что балка разрезная, предполагаем отсутствие действия временной нагрузки (кран переместился на другой участок). В данном случае под временной нагрузкой понимается крановая нагрузка.

К максимально возможной интенсивности нагрузки относится постоянная нагрузка, к которой

добавляется временная крановая нагрузка, а это вес мостового крана, вес тележки и вес груза (грузоподъемность крана).

Проведены расчеты усталостной прочности для различных режимов нагружения крана 32/5 с

использованием программы Microsoft Excel. Результаты расчетов для крана 32/5 т режима работы 3К представлены в табл. 1, а для других режимов 6К и 8К в виде графиков (рис. 3 и 4).

Таблица 1

Усталостная прочность для крана 32/5 т режима работы 3К

Table 1

Fatigue strength for crane 32/5 t operating mode 3K

| Продолжительность, лет Period, years | Количество циклов, N Quantity cycles, N | Усталостная прочность σ_R , МПа Fatigue strength σ_R МПа | |
|---|--|---|---------------------|
| | | СП 16.13330.2017 | СП 294.1325800.2017 |
| 5 | $3,0 \cdot 10^5$ | 328,88 | 833,65 |
| 10 | $6,1 \cdot 10^5$ | 301,12 | 683,17 |
| 15 | $9,2 \cdot 10^5$ | 275,84 | 586,50 |
| 20 | $1,2 \cdot 10^6$ | 253,02 | 513,79 |
| 25 | $1,5 \cdot 10^6$ | 232,68 | 455,90 |
| 30 | $1,8 \cdot 10^6$ | 214,80 | 408,77 |
| 35 | $2,1 \cdot 10^6$ | 199,39 | 370,21 |
| 40 | $2,4 \cdot 10^6$ | 186,45 | 338,86 |
| 45 | $2,7 \cdot 10^6$ | 175,98 | 313,86 |
| 50 | $3,1 \cdot 10^6$ | 167,98 | 294,59 |

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

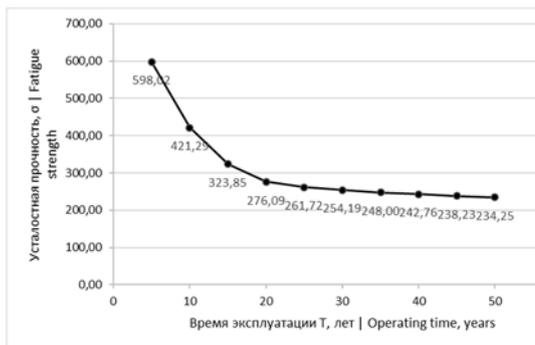


Рисунок 2. Кривая усталости для крана 32/5 т при режиме работы 6К

Figure 2. Fatigue curve for crane 32/5 t at 6K operating mode

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

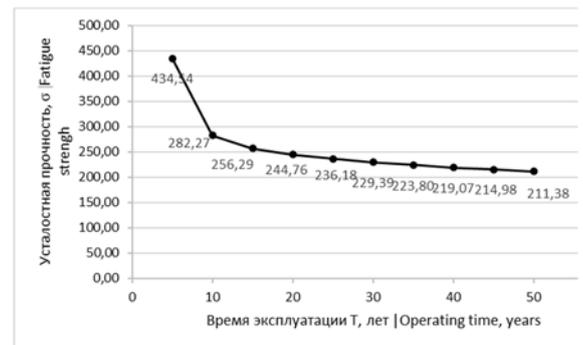


Рисунок 3. Кривая усталости для крана 32/5 т при режиме работы 8К

Figure 3. Fatigue curve for crane 32/5 t at 8K operating mode

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Анализ кривых усталости, полученных согласно СП 294.1325800.2017 для различных

режимов показал, что при режиме 3К кривая усталости плавно снижается на протяжении всего

времени эксплуатации от 833,65 МПа до 294,59 МПа. При среднем режиме 6К кривая усталости резко снижается за срок эксплуатации 20 лет от 598,02 МПа до 323,85 МПа, а затем плавно в течение 30 лет до значения 234,25 МПа. При тяжелом режиме эксплуатации 8К кривая усталости резко снижается за 10 лет эксплуатации от 434,54 МПа до 282,27 МПа, а за оставшиеся 40 лет плавно снижается до значения 211,38 МПа.

На основе данных об усталостной прочности, полученных в результате расчета

согласно СП16.13330.2017, можем прогнозировать снижение несущей способности под-крановой балки, используя при этом известные кривые усталости (графики на рис. 2 и 3).

Далее в табличной форме (табл. 2) представлены результаты расчета показателя риска для крана 32/5 т при режиме 3К согласно СП 294.1325800.2017, а для других режимов 6К и 8К в виде графиков (рисунки).

Таблица 2

Определение показателя риска для крана 32/5 т и 3К

Table 2

Determination of the risk indicator for the crane 32/5 t and 3K

| Срок службы, лет Service life, years | R_r , кН/см ² | \bar{R} , кН/см ² | σ_R , кН/см ² | γ | $\varphi(\gamma)$ | V | Q_f |
|--|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------|-------------------|------------------|-------|
| 5 | 83,37 | 99,78 | 9,98 | 7,90 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 10 | 68,32 | 81,77 | 8,18 | 7,37 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 15 | 58,65 | 70,20 | 7,02 | 6,90 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 20 | 51,38 | 61,49 | 6,15 | 6,42 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 25 | 45,59 | 54,57 | 5,46 | 5,94 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 30 | 40,88 | 48,93 | 4,89 | 5,46 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 35 | 37,02 | 44,31 | 4,43 | 5,00 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 40 | 33,89 | 40,56 | 4,06 | 4,56 | 4,99997 | $3,0 \cdot 10^6$ | 5,52 |
| 45 | 31,39 | 37,57 | 3,76 | 4,17 | 0,499977 | $2,3 \cdot 10^6$ | 4,63 |
| 50 | 29,46 | 35,26 | 3,53 | 3,83 | 0,499936 | $6,4 \cdot 10^5$ | 4,19 |

Примечание: R_r – усталостная прочность материала; \bar{R} – среднееарифметическое значение распределения прочности стали; σ_R – среднееквадратическое значение распределения прочности стали; γ – характеристика безопасности; $\varphi(\gamma)$ – интеграла вероятности Гаусса; V – вероятности разрушения; Q_f – логарифмический показатель риска

Note: R_r – the fatigue strength of the material; \bar{R} – the arithmetic mean value of the steel strength distribution; σ_R – the RMS value of the steel strength distribution; γ – the safety characteristic; $\varphi(\gamma)$ – the Gaussian probability integral; V – the probability of failure; Q_f – the logarithmic risk indicator

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

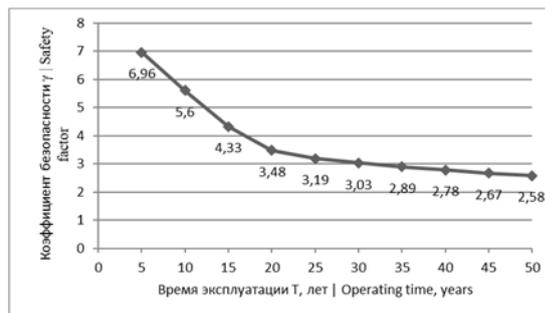


Рисунок 4. Зависимость коэффициента безопасности γ от времен эксплуатации крана 32/5 т при режиме работы 6К

Figure 4. The dependence of the safety coefficient γ on the operating time of the crane 32/5 t at 6K operation mode

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таким образом, анализ зависимостей коэффициента безопасности γ от времен эксплуатации крана для различных режимов показал, что при режиме 3К зависимость плавно снижается на протяжении всего времени эксплуатации от 7,90 до 3,83. При среднем режиме 6К зависимость резко снижается за срок эксплуатации 20 лет от 6,96 до 2,58. При тяжелом режиме эксплуатации 8К зависимость коэффициента безопасности резко снижается за 10 лет эксплуатации от 5,73 до 2,01.

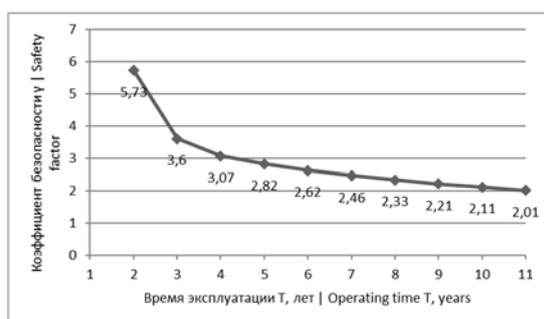


Рисунок 5. Зависимость коэффициента безопасности γ от времен эксплуатации крана 32/5 т при режиме работы 8К

Figure 5. The dependence of the safety coefficient γ on the operating time of the crane 32/5 t in the operating mode of 8K

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Проведены исследования повышения надежности металлоконструкций манипуляторов лесотранспортных машин путем применения новых пневмогидравлических демпфирующих устройств. Установлено, что при подключении пневмогидравлического аккумулятора максимальные всплески давления рабочей жидкости, которые передаются на металлоконструкцию стрелы, уменьшаются в 1,5-1,7 раза [22].

В результате статистического анализа среднемаксимальных всплесков давления рабочей жидкости были получены следующие статистические характеристики (табл. 3).

Таблица 3

Статистические данные анализа давления системы без аккумулятора и с аккумулятором

Table 3

System pressure analysis statistics without accumulator and with accumulator

| | Без аккумулятора Without accumulator | С аккумулятором With accumulator |
|---|--|------------------------------------|
| Название Name | Значение Value | |
| Среднее Average | 17,933 | 10,460 |
| Стандартная ошибка Standard error | 0,3092 | 0,3199 |
| Медиана Median | 17,5 | 10,235 |
| Стандартное отклонение Standard deviation | 1,0255 | 1,061 |
| Дисперсия выборки Sample variance | 1,0518 | 1,1259 |
| Экцесс Excess | 0,09976 | -0,3240 |
| Асимметричность Asymmetry | 0,96401 | 0,5128 |

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Полученные статистические значения асимметричности нагрузки (табл. 3) необходимо учитывать при расчетах на надежность по предлагаемой методике.

Выводы

1. К настоящему моменту времени в практике расчета металлоконструкций на надежность в большей степени преобладают теоретические методы.

2. На основании выполненных теоретических исследований была достигнута основная цель работы, а именно создание методики расчета надежности металлоконструкции ПТМ лесного комплекса с учетом усталостной прочности материала, базирующейся на определении числовых показателей надежности исследуемой конструкции.

3. На основе результатов расчета согласно СП 294.1325800.2017 можно сделать вывод о том, что надежность подкрановых балок для кранов

различной грузоподъемности 32/5 т обеспечена с учетом влияния усталости материала. Причем ограниченно-работоспособное состояние для более легкого крана наступает через достаточный срок эксплуатации.

4. Анализ результатов расчета по СП16.13330.2017 свидетельствует о том, что при расчете усталостной прочности следует обращать особое внимание на асимметричность нагрузки, так как это понижает значение усталостной прочности и как следствие со временем эксплуатации надежность, в особенности при больших значениях количества циклов нагружения.

5. Одним из эффективных методов повышения надежности металлоконструкций манипуляторов мобильных лесотранспортных машин является подключение в гидроприводы новых пневмогидравлических демпфирующих устройств.

Список литературы

1. Лукашук О.А. Усталостный расчет металлоконструкций грузоподъемных машин /Лукашук О.А., Швецов В.В. // Сб. по материалам конференции «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники» (26–27 мая 2022 года, г. Брянск), с.90-95. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49399814&pff=1>
2. Короткий А.А. Вопросы безопасности соединений конструкций грузоподъемных кранов / А. А. Короткий, А. Н. Павленко, Э. А. Панфилова, Д. Н. Симонов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 1. — С. 41–47. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48060515>
3. Селиверстов В.Г. Взаимосвязь усталостных и коррозионных процессов при оценке ресурса несущих металлоконструкций грузоподъемных машин / Г. В. Селиверстов, К. С. Коломиец В. Ю. Анцев, Н. В. Анцева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021 – Вып. 3. – С. 132-137. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45684528>
4. Селиверстов Г.В., Моисеев В.И. Оценка накопленной поврежденности по критерию роста трещины // Строительные и дорожные машины. 2020. 7. С. 31-35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44044596>
5. Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Ищук Я.Л. Повышение несущей способности нахлесточного соединения тонколистовых деталей // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова, 2019 №9. С.30-35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41213602>
6. Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A. Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets at tension flange // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 148. Pp. 572–588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.05.038>
7. Котесов, А. А. Методика обеспечения безотказности металлоконструкций грузоподъемных кранов в течение срока службы / А. А. Котесов, В. Е. Касьянов, А. А. Котесова // Вестник РГУПС. – 2020. – № 4. – С. 30–39. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44503577>
8. Зверев И.А. Методика оценки статической прочности шарнирных соединений лесных машин с использованием программного обеспечения «ANSYS» / Зверев И.А., Трофимов А.В. // Повышение

эффективности лесного комплекса : материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, ФГБОУ Петрозав. гос. ун-т. — Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, 2022, с.171-174 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119394>

9. Мыльников в.в.1, Пронин а.и.2, Кондрашкин о.б.1, Шетулов д.и., Исследование строительной стали при испытаниях на усталость по схеме консольного изгиба с вращением/ «Механическое оборудование металлургических заводов». №2(17) 2021 с.3-8 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47961181>

10. Гучинский Р.В. Неопределенности в оценке усталости конструкций при проектировании и эксплуатации / Р. В. Гучинский, С. В. Петинов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения – 2021.– № 4 (52). – С. 35-44. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47395900>.

11. Скобцов И.Г. Оценка вероятности отказа элементов конструкций лесных машин при неполной информации о нагруженности / И. Г. Скобцов, М. С. Королев, А. Д. Шабалин // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2021, с.174-177. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47156156>

12. Pitukhin, A. V. Optimal Design Based on Probability Approach And Fracture Mechanics / A. V. Pitukhin, I. G. Skobtsov [Electronic resource] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - № 560. DOI:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012085>

13. Тарбеев А. А. Обеспечение надежности гидроприводов лесных машин совершенствованием методов и средств их диагностирования Специальность 05.21.01 – технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Йошкар-Ола, 2019. Режим доступа: https://www.volgatech.net/upload/documents/defence-of-theses/diss_TarbeevAA.pdf.

14. Черник Д. В., Черник К. Н. 2020 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 919 052037 DOI: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/919/5/052037>.

15. Chernik D. V. Dynamic measurements of side loads on technological equipment of tracked forest loader 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) Режимдоступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43234115>

16. Лагерева А.В., Лагерева И.А. Моделирование рабочих процессов в дроссельнорегулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // Научотехнический вестник Брянского государственного университета. 2018. №4. С. 355- 379. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379>

17. Ловейкин, В. С. Синтез оптимального динамического режима движения стрелы манипулятора, установленного на упругом основании / В. С. Ловейкин, Д. А. Мишук // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 1. С. 55–61. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37083940>.

18. Попиков П.И., Четверикова И.В., Воскобойник М.Ю., Моделирование рабочих процессов гидропривода механизма подъема манипулятора автосортировочного// актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. №7 (43). С. 76-80 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745449>

19. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators // Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 20. – P. 6566. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>.

20. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load // Mechatronics. – 2021. – Т. 77. – P. 102599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599>.

21. Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator // Actuators. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – P. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/act9010012>.

22. Glushkov S. Rybak A., Popikov P., Uskov V., Bogdanov D., Konyukhov A. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator // Forestry Engineering Journal. 2021. T. 11. № 4 (44). P. 88-99. DOI:<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8>

References

1. Lukashuk O.A. Fatigue calculation of metal structures of lifting machines /Lukashuk O.A., Shvetsov V.V.// Collection based on the materials of the conference "Innovative development of lifting and transport technology" (May 26-27, 2022, Bryansk), pp.90-95/ URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49399814&pf=1>

2. Korotkiy A.A. Questions of safety of joints of structures of lifting cranes / A. A. Korotkiy, A. N. Pavlenko, E. A. Panfilova, D. N. Simonov // Safety of technogenic and natural systems. — 2022. — No. 1. — pp. 41-47. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48060515>

3. Seliverstov V.G. Interrelation of fatigue and corrosion processes in assessing the resource of load-bearing metal structures of lifting machines / G. V. Seliverstov, K. S. Kolomiets V. Yu. Antsev, N. V. Antseva // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. — 2021 — Issue 3 — pp. 132-137. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45684528>

4. Seliverstov G.V., Moiseev V.I. Assessment of accumulated damage by the criterion of crack growth // Construction and road machines. 2020. 7. pp. 31-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44044596>

5. Solodov N.V., Vodyakhin N.V., Ishchuk Ya.L. Increasing the load-bearing capacity of the overlapping connection of thin-sheet parts // Bulletin of BSTUim.V.G.Shukhov, 2019 No.9.Pp.30-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41213602>

6. S.H Xia и JG Teng [9]. 9. Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A. Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets attension flange // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 148. Pp. 572–588. DOI: <https://doi:10.1016/j.jcsr.2018.05.038>

7. Kotesov, A. A. Methodology for ensuring the reliability of metal structures of lifting cranes during the service life / A. A. Kotesov, V. E. Kasyanov, A. A. Kotesova // Bulletin of RSUPS. — 2020. — No. 4. — pp. 30-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44503577>

8. Zverev I.A. Methodology for assessing the static strength of articulated joints of forest machines using the ANSYS software / Zverev I.A., Trofimov A.V. // Improving the efficiency of the forest complex : materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation / M-in Science and Higher Education. education grew. Federation, Petrozavodsk State University. — Petrozavodsk : PetrSU Publishing House, 2022, pp.171-174 URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119394>

9. Mylnikov V.v.1, Pronin A.I.2, Kondrashkin O.B.1, Shetulov D.I., Investigation of construction steel during fatigue tests according to the scheme of cantilever bending with rotation/ "Mechanical equipment of metallurgical plants". No.2(17) 2021 pp.3-8 URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47961181>

10. Guchinsky R.V. Uncertainties in the assessment of structural fatigue during design and operation/ R. V. Guchinsky, , S. V. Petinov //Bulletin of the Ural State University of Railways • No. 4 (52) • 2021 from 35-44 URL: <https://ISSN 2079-0392>

11. Skobtsov I.G. Estimation of the probability of failure of structural elements of forest machines with incomplete information about loading / I. G. Skobtsov, M. S. Korolev, A.D. Shabalin// Improving the efficiency of the forest complex : materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation / Ministry of Science and Higher Education. education grew. Federation, Petrozavodsk State University. — Pet-rozavodsk : PetrSU Publishing House, 2021, pp.174-177. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47156156>

12. Pitukhin, A. V. Optimal Design Based on Probability Approach And Fracture Mechanics / A. V. Pitukhin, I. G. Skobtsov [Electronic resource] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - № 560. DOI: <https://doi:10.1088/1757-899X/560/1/012085>

13. Tarbeev A. A. Ensuring the reliability of hydraulic drives of forest machines by improving methods and means of their diagnosis Specialty 05.21.01 – technology and machines of logging and forestry. Abstract dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Yoshkar-Ola, 2019
14. D. V. Chernik and K. N. Chernik 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 919 052037 DOI: <http://doi:10.1088/1757-899X/919/5/052037>
15. Chernik D. V. Dynamic measurements of side loads on technological equipment of tracked forest loader 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43234115>
16. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling of work processes in a throttle-controlled hydraulic drive of manipulative systems of mobile machines with separate movement of links // Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University. 2018. No. 4. pp. 355-379. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379>
17. Loveykin, V. S. Synthesis of the optimal dynamic mode of movement of the manipulator boom mounted on an elastic base / V.S. Loveykin, D.A. Mishchuk // Science and Technology. 2019. Vol. 18, No. 1, pp. 55-61. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37083940>
18. Popikov P.I., Chetverikova I.V., Voskoboynik M. U., Modeling of working processes of hydraulic drive of lifting mechanism of a manipulator of an auto-sorting truck// current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2018. Vol. 6. No.7 (43). pp. 76-80 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745449>
19. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators // Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 20. – P. 6566. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>
20. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load //Mechatronics. – 2021. – Т. 77. – P. 102599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599>
21. Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator //Actuators. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. – Т. 9. – №. 1. – P. 12. DOI: <https://doi:10.3390/act9010012>
22. Glushkov S. Rybak A., Popikov P., Uskov V., Bogdanov D., Konyukhov A. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator // Forestry Engineering Journal. 2021. Т. 11. № 4 (44). P. 88-99. DOI: <https://doi:10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8>

Сведения об авторах

✉ *Попикова Алина Викторовна* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: poalinka@mail.ru.

Конюхов Андрей Валерьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: akoniukhov@gmail.com.

Попиков Сергей Константинович – руководитель группы, ООО «ИКПАД» – Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, Российская Федерация, 394055, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: sergpopikov@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Alina V. Popikova* – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str.,8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail, e-mail: poalinka@mail.ru.

Andrey V. Konyukhov – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str.,8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: akoniukhov@gmail.com.

Sergei K. Popikov – team leader, Institute of Integrated Highway Design, LLC, Deputatskaya str., 11, Voronezh, Russian Federation, 394055, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: sergpopikov@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author