

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>

УДК 630 : 621.865.8



Статическое нагружение силового гидропривода звеньев манипулятора лесотранспортной машины в критическом режиме

Ольга Р. Дорняк¹✉, ordornyak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>

Людмила В. Маркова², l_v_markova@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3623-1594>

Сергей К. Попиков³, sergpopikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

Павел В. Танчук¹, pavlentpv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0008-1357-2649>

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

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

³Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, 394055, Российская Федерация

Безопасные и эффективные режимы работы погрузочно-разгрузочной техники манипуляторного типа в лесном комплексе предполагают обязательное горизонтальное положение рамы лесотранспортной машины. В неблагоприятных производственных условиях лесотранспортная машина может оказаться в критической ситуации, связанной с поворотом рамы относительно горизонта. Коррекция такого положения может быть обеспечена за счет использования аутригеров или автоматических выравнивателей опорно-поворотных устройств. Для этого необходимо теоретическое исследование статических нагрузок, характерных для гидроцилиндров, аутригеров и других звеньев гидроманипулятора при различных конфигурациях. Для описания условий равновесия изучаемой механической системы «базовая лесотранспортная машина – аутригеры – стрела – рукоять с телескопическим удлинителем – устройство захвата – гидроприводы» использованы уравнения равновесия в обобщенных координатах. В качестве обобщенных координат выбраны угол поворота рамы опорно-поворотного устройства, угол поворота стрелы, угол поворота рукояти и удлинение её телескопической части. Аналитические выражения для усилий на штоках гидроцилиндров и значения давления рабочей жидкости в поршневых полостях гидроцилиндров в состоянии равновесия при различном положении звеньев манипулятора могут быть использованы при проектировании технологических режимов эксплуатации лесотранспортных машин. Особую значимость это приобретет для лесопромышленных предприятий при планировании операций погрузки-разгрузки сортиментов с возможностью выведения опорно-поворотного устройства в горизонтальное положение.

Ключевые слова: гидравлический манипулятор, лесотранспортная машина, аутригер, гидравлический цилиндр, математическая модель; опорно-поворотное устройство; горизонтальное (критическое) положение

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Статическое нагружение силового гидропривода звеньев манипулятора лесотранспортной машины в критическом режиме / О. Р. Дорняк, Л. В. Маркова, С. К. Попиков, П. В. Танчук // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 87–104. – Библиогр.: с. 100–104 (29 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>.


Поступила 25.04.2023. *Пересмотрена* 07.06.2023. *Принята* 15.06.2023. *Опубликована онлайн* 18.09.2023

Article

Static loading of the power hydraulic drive of the manipulator links of the timber transport machine in critical mode

Olga R. Dorniyak¹ ✉, ordorniyak@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>

Lyudmila V. Markova², l_v_markova@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3623-1594>

Sergey K. Popikov², popikovpetr@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Paul V. Tanchuk¹, pavlentpv@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0008-1357-2649>

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

²*Heat and mass transfer institute of the national academy of sciences of Belarus, Brovki str., 15, Minsk, 220072, Belarus*

³*Institute for Integrated Design of Highways, Deputatskaya str., 11, Voronezh city, 394055, Russian Federation,*

Abstract

The safe and effective modes of operation of handling equipment of the manipulator type for the forest complex assume a mandatory horizontal position of the frame of the mobile technological machine. In unfavorable production conditions, a forest transport machine may find itself in a critical situation associated with the rotation of the manipulator's support frame relative to the horizon. Correction of this situation can be provided through the use of outriggers. This paper presents the results of a theoretical study of static loads that are characteristic of hydraulic cylinders of outriggers and other elements of the hydraulic manipulator of a forest transport machine with its various configurations. Technologies for loading, moving and unloading forest cargoes can be carried out using special equipment, subject to certain rules. The safe and effective operation modes of manipulator handling equipment assume a mandatory horizontal position of the support-turntable. In unfavorable production conditions, the wood transport machine may find itself in a critical situation related to the rotation of the support and turning frame of the manipulator relative to the horizon. Correction of such position can be insured by use of outriggers. This paper presents the theoretical study results of the static loads, which are characteristic for the hydraulic cylinder of outrigger and other elements of the hydraulic manipulator of a timber transport machine in its various configurations. Balance equations in generalized coordinates are used to describe the equilibrium conditions of the mechanical system under study, which includes a basic vehicle, outriggers, a boom, a handle with a telescopic extension, a grip device and hydraulic drives that ensure their functioning. The rotation angle of support-turning frame in vertical plane, the boom rotation angle, the handle rotation angle and extension of the telescopic part are selected as generalized coordinates. Analytical expressions are obtained for forces on rods of hydraulic cylinders and the working fluid pressure values in piston cavities of hydraulic cylinders in equilibrium state at different position of manipulator links. Calculations based on the obtained formulas can be used in designing technological modes of operation of timber transport machines for carrying out loading and unloading operations of cargoes with the possibility of bringing the support-turntable into a horizontal position.

Keywords: *hydraulic manipulator, forest transport machine, outrigger, hydraulic cylinder, mathematical model*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

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

For citation: Dornyak O.R., Markova L.V., Popikov S.K., Tanchuk P.V. (2023). Static loading of the power hydraulic drive of the manipulator links of the timber transport machine in critical mode. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 87-104 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>.

Received 25/04.2023. *Revised* 07.06.2023. *Accepted* 15.06.2023. *Published online* 18.09.2023.

Введение

Безопасные и эффективные режимы работы погрузочно-разгрузочной техники манипуляторного типа⁷ в лесном комплексе предполагают обязательное горизонтальное положение рамы мобильной транспортно-технологической машины [1]. Работа лесных машин часто осуществляется в неблагоприятных природно-климатических условиях [29], к числу которых относятся неоднородная податливость грунта, сложный профиль поверхности данной местности. В таких условиях возможны критические ситуации, связанные с наклоном рамы манипулятора.

Коррекция такого положения может быть обеспечена за счет использования аутригеров.

Аутригеры представляют собой выносные поворотные или выдвигные опоры с опорными винтовыми или гидравлическими домкратами⁸ (рис. 1) [2,3]. Выбор конструкции аутригера определяется массой базовой машины. При испытаниях легковых автомобилей на устойчивость используются аутригеры в виде балок, закрепляемых на заднем и переднем бамперах, или в виде рычажных конструкций, закреплённых на боковых частях кузова. Контактные слайдеры расположены на концах

балок [4]. Большинство современных лесотранспортных машин оснащены гидрофицированными аутригерами, конструктивно совмещенными с гидроцилиндрами, подключенными в общую гидравлическую схему машины [5].



Рисунок 1. Манипулятор Атлант-С 140-05 (Майкопский машиностроительный завод).

Аутригеры установлены в рабочем режиме

Источник: <https://img.bizorg.ru/goods/190/157/1901579.jpg>

Figure 1. Manipulator Atlant-C 140-05 (Maikop Machine-building Plant). Outriggers are installed in working mode

Source:

<https://img.bizorg.ru/goods/190/157/1901579.jpg>

⁷ Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: монография / З.К. Емтыль, И.М. Бартенева, М.В. Драпалок [и др.]; под ред. д-ра технических наук, проф. И.М. Бартенева. – М.: ФЛИНТА : Наука, 2011.- 408 с.

⁸ Александров М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Высшая школа, 2000. – 552 с.

Способы выравнивания рамы манипуляторов постоянно совершенствуются. Авторы [5] обосновали эффективность дополнения аустригеров анкерными устройствами, которые снижают влияние на лесотранспортную машину опрокидывающих и сдвиговых эксплуатационных нагрузок. В [6] предложено устройство, повышающее устойчивость стрелового крана на слабонесущих грунтах за счет укладки специальной ленты и последующего наезда на нее ходового оборудования. Для того чтобы использовать кран на грунтах текучей и пластично-текучей консистенции, в работе [7] предлагается установка дополнительных опорных плит, опускаемых под аустригеры с помощью канатно-блочной системы.

С целью повышения производительности погрузочно-разгрузочных работ И.Р. Шегельманом и соавторами (2016)⁹ предложена конструкция автопоезда-сортиментовоза, где предусмотрено перемещение манипулятора вдоль кузова транспортного средства. Эта конструкция увеличивает обслуживаемую площадь с одной стоянки транспортного средства. При этом аустригеры, закрепленные на подвижной раме манипулятора [8], позволяют жестко зафиксировать манипулятор относительно земли.

Процесс выравнивания опорно-поворотного устройства (ОПУ) с помощью аустригеров первоначально осуществлялся вручную, поэтому являлся достаточно трудоёмким и затратным по времени. В работах [9-11] предложен метод решения этой проблемы с использованием специально разработанных устройств автоматического выравнивания гидроманипулятора. Такие устройства защищены патентами РФ, их применение расширяет технологические возможности безопасного процесса погрузки лесоматериалов отечественными лесотранспортными машинами [12].

Для формирования эффективного управляющего воздействия для указанных устройств необ-

ходимы теоретические исследования динамики взаимодействия всех элементов машины¹⁰ в зависимости от широкого спектра конструктивных и режимных параметров [13]. Для обеспечения надежности работы лесотранспортной машины важно оценить величину давления рабочей жидкости в гидравлических цилиндрах аустригеров, стрелы, рукоятки и ее телескопической части.

Большинство исследований такого типа основано на построении математических моделей кинематики¹¹ и динамики¹³ механизмов в рамках закономерностей [14-16], разработанных в теоретической механике, теории машин и механизмов [17-20]. Также имеются публикации с результатами прочностных расчетов, выполненных для элементов гидроманипулятора лесотранспортной машины [5].

В работе Ф.Ф. Дахиева¹⁴ и соавторов (2015) рассмотрена динамика машины манипуляторного типа с четырьмя степенями свободы. Авторы исследовали шарнирно-сочлененный манипулятор, элементами которого являются колонна, стрела, телескопическая рукоятка, а также комплекс гидроцилиндров. Предполагается, что рама манипулятора стабильно занимает горизонтальное положение, так что работа аустригеров не рассматривается.

⁹ Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Васильев А. С. Оценка путей модернизации лесовозного автопоезда, оснащенного гидроманипулятором. *Фундаментальные исследования*. 2016; 12-4: 789-794. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27708160>.

¹⁰ Добрачев А. А., Раевская Л. Т., Швец А. В. Кинематические схемы, структуры и расчет параметров лесопромышленных манипуляторных машин: монография. – Екатеринбург, 2014: 128 с. – ISBN 978-5-94984-450-2

¹¹ Ермалицкий А. А., Клоков Д. В., Насковец М. Т. Математическое моделирование процессов погрузки пачек сортиментов и хлыстов колесным лесопогрузчиком с гидроманипулятором. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2005; 11: 8-12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23757593>.

¹² Мохов С. Е., Арико С. Е., Лой В. Н. Кинематика харвестерного рычажного манипулятора параллельного типа. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. 2008; 2: 47-51. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23834086>.

¹³ Скоробогатова Т. Е. Динамические нагрузки в конструкции лесопогрузчика в режиме поворота гидроманипулятора. *Вестник КрасГАУ*. 2006; 5: 412-415. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9253357>.

¹⁴ Дахиев Ф. Ф., Раевская Л. Т. Расчет обобщенных сил лесного манипулятора с четырьмя степенями свободы. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; 1-1: 75. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25323100>.

Строго и последовательно изложены все шаги построения уравнений Лагранжа 2 рода применительно к динамическому процессу погрузки-разгрузки сортиментов гидроманипулятором в рамках сделанных предположений.

Наличие звеньев с изменяющейся длиной [16] усложняет задачи кинематики и динамики манипулятора. Модель телескопического звена, предложенная в [21], состоит из двух абсолютно твердых инерционных участков, расположенных на концах звена и невесомого участка переменной длины, расположенного посередине звена.

Следует отметить, что результаты моделирования движения роботов различного назначения широко представлены в научной литературе. Основой математического описания являются классические принципы и уравнения механики. Для надежного функционирования манипуляционного устройства в переходных режимах требуется разработка алгоритма управления движением. Для конкретных видов манипуляторов предложены алгоритмы, обладающие свойством робастности по отношению к их инерционным параметрам [22].

Классические методы механики позволили разработать системы автоматизированного создания математических моделей для решения задач кинематики и динамики различных роботов и манипуляторов, которые успешно применяются многими исследователями [23-24]. Известный алгоритм Денавита-Хартенберга стал основой для ряда эффективных программных математических комплексов, предназначенных для проектирования и исследования робототехнических систем [25-26]. В работе [27] представлено решение задачи оптимального управления лесным гидравлическим манипулятором с 4 степенями свободы для минимизации затрат на энергопотребление привода удлинителя рукояти с использованием этого алгоритма. Значи-

тельный объем полевых экспериментов автора подтвердил прогнозируемое моделью снижение энергозатрат на 15-30%.

Целью данной работы является изучение интенсивности статического нагружения системы гидроцилиндров мобильной транспортно-технологической машины при различных положениях рамы опорно-поворотного устройства, стрелы и рукояти с телескопическим удлинителем.

Материалы и методы

Исследование процесса работы гидроманипулятора проводится методами аналитической механики. Расчетная схема для изучаемой механической системы представлена на рис. 2. В систему включены базовый автомобиль, рама опорно-поворотного устройства, поворотная колонна, стрела, рукоять, телескопический удлинитель рукояти, ауриггеры и гидроцилиндры.

Приняты следующие допущения. Все элементы механической системы считаются абсолютно твердыми. Груз, захваченный грейфером, движется поступательно в этой же плоскости. Процесс деформации грунта под лапами ауриггеров завершен, при этом рама лесотранспортной машины занимает наклонное положение к горизонту. Вес гидроцилиндров существенно меньше, чем вес других конструктивных элементов. Центр тяжести каждого элемента принадлежит оси симметрии этого элемента. Поворот колонны вокруг оси вращения не рассматривается. Движение колонны вместе с опорно-поворотным устройством, стрелы, рукояти и груза происходят в вертикальной плоскости за счет изменения длины правого ауриггера.

Рассматриваемая механическая система при указанном ограничении имеет 4 степени свободы. Наложённые механические связи являются идеальными голономными стационарными.

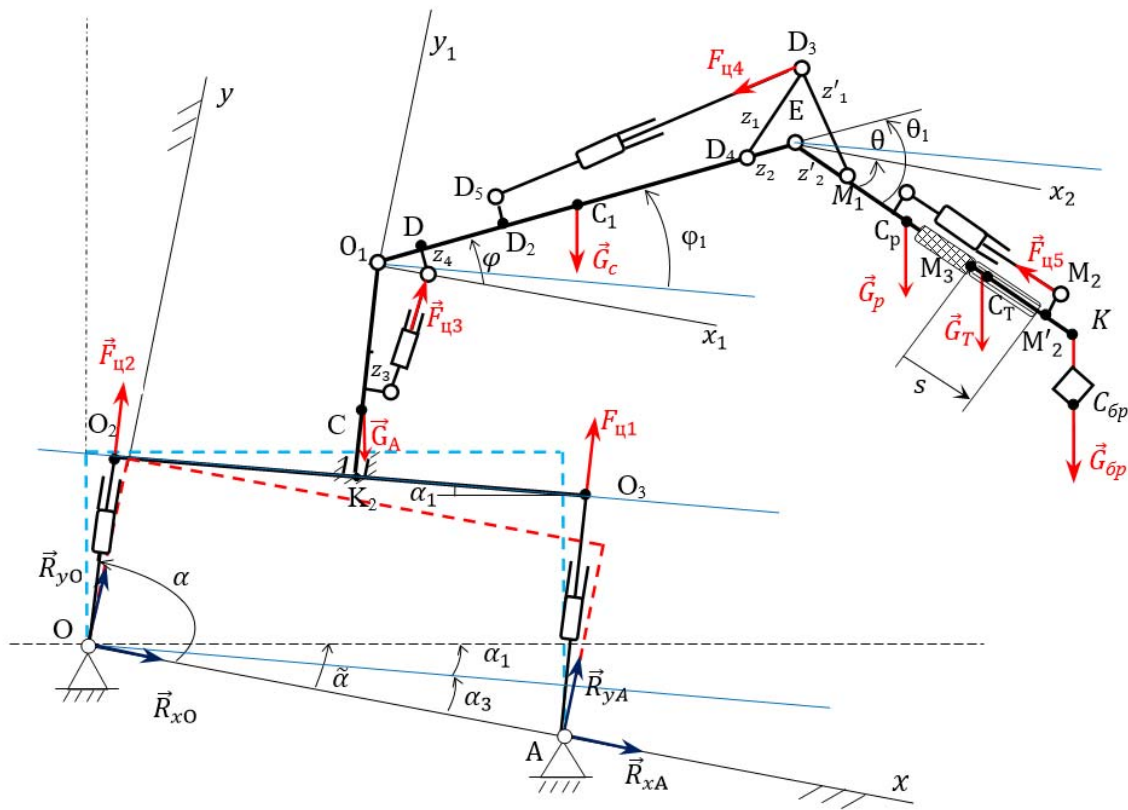


Рисунок 2. Расчетная схема. Конфигурация опорно-поворотного устройства в критическом положении - - - - -, в рабочем положении - - - - -, в произвольном положении - ——— .

Линии вида обозначают горизонтальное, а вида вертикальное направление.

Прямые вида параллельны раме опорно-поворотного устройства

Источник: Собственная композиция авторов

Figure 2. Calculation scheme. Configuration of the pivot frame

in a critical position - - - - -, in the working position - - - - -, in an arbitrary position - ——— .

The lines of the view indicate the horizontal, and the view the vertical direction.

The straight lines of the view are parallel to the pivot frame

Source: Own Composition

Для изучения состояния равновесия системы при различных положениях рамы опорно-поворотного устройства, стрелы, рукояти и телескопического удлинителя воспользуемся уравнениями в обобщенных координатах. Для равновесия данной механической системы необходимо и достаточно, чтобы все обобщенные силы равнялись нулю¹⁵ [28].

¹⁵ Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. – СПб.: Издательство "Лань", 1998. – 768 с.

Условия равновесия механизма рассматриваются относительно неподвижной системы отсчета OXYZ (рис. 2). Ось OX проходит через центры слайдеров после проседания грунта (точки O и A), OY совмещается с осью гидроцилиндра левого аутиригера.

Дополнительно на рис. 2 показаны вспомогательные системы координат, оси которых параллельны неподвижным осям, а начало совпадает с центром соответствующего шарнира. Система осей O1X1Y1Z1 используется для описания положения

точек стрелы, $EX_2Y_2Z_2$ - для точек рукояти и телескопического удлинителя.

Приняты обозначения:

- α - угол поворота левого аутригера;
- $\tilde{\alpha}$ - угол между осью OX и горизонтом, характеризующий степень деформации грунта под правым аутригером;
- α_1 - угол между плоскостью рамы опорно-поворотного устройства и горизонтальной плоскостью;
- α_3 - угол между осью OX и линией O_2O_3 ;
- φ - угол между осью O_1X_1 и осью стрелы O_1E ;
- φ_1 - угол между проекцией плоскости рамы опорно-поворотного устройства на вертикальную плоскость и осью стрелы O_1E ;
- θ - угол между осью EX_2 и осью рукояти EM_2 ;
- θ_1 - угол осью рукояти EM_2 и осью стрелы O_1E ;
- s - величина телескопического удлинения M_2M_3 .

Центры тяжести отдельных элементов механической системы обозначены для автомобиля - C_A , для стрелы - C_1 , для рукояти - C_P , для телескопической части - C_T , для ротатора грейфера и груза сортиментов - C_{6p} . Соответствующие обозначения введены для сил тяжести этих элементов: $\vec{G}_A, \vec{G}_1, \vec{G}_P, \vec{G}_T, \vec{G}_{6p}$.

Кроме сил тяжести к внешним силам, действующим на механическую систему относятся силы давления, приложенные к штокам гидроцилиндров аутригеров $\vec{F}_{ц1}$ и $\vec{F}_{ц2}$, стрелы $\vec{F}_{ц3}$, рукояти $\vec{F}_{ц4}$, телескопического удлинителя $F_{ц5}$, а также реакции опор $\vec{R}_{OX}, \vec{R}_{OY}, \vec{R}_{AX}, \vec{R}_{AY}$.

В качестве обобщенных координат выбраны угол поворота рамы опорно-поворотного устройства в вертикальной плоскости α , угол поворота стрелы φ , угол поворота рукояти θ и удлинение телескопической части s (рис. 2).

Уравнения равновесия в обобщенных координатах имеют вид

$$Q_\alpha = 0, Q_\varphi = 0, Q_\theta = 0, Q_s = 0. \quad (1)$$

Здесь Q_i - обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате q_i ($i=\alpha, \varphi, \theta, s$). Известно, что для вычисления обобщенной силы Q_i необходимо задать системе возможное перемещение, при котором $\delta q_i > 0$, при этом другие обобщенных q_j координаты не изменяются: $\delta q_j = 0$ ($j \neq i$). Затем вычисляется сумма элементарных работ всех внешних сил на данном перемещении δA_i . Обобщенная сила $Q_i = \delta A_i / \delta q_i$.

Вывод уравнений равновесия является достаточно громоздким, поэтому рассмотрим основные моменты указанного выше алгоритма.

1. Полагаем $\delta s > 0$, при этом $\delta \alpha = 0, \delta \varphi = 0, \delta \theta = 0$.

$$\delta A_s = \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}).$$

Элементарная работа каждой из трех сил на данном перемещении вычисляется как скалярное произведение вектора силы \vec{F} на вектор элементарного перемещения точки ее приложения $\vec{\delta r}$.

$$\delta A(\vec{F}_{ц5}) = -F_{ц5} \delta s; \delta A(\vec{G}_T) = G_T \delta s \cos \gamma; \delta A(\vec{G}_{6p}) = G_{6p} \delta s \cos \gamma; \gamma = \frac{\pi}{2} + \theta - \alpha_1.$$

2. Полагаем $\delta \theta > 0$, при этом $\delta \alpha = 0, \delta \varphi = 0, \delta s = 0$.

$$\delta A_\theta = \delta A(\vec{F}_{ц4}) + \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_P) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}).$$

3. Полагаем $\delta \varphi > 0$, при этом $\delta \alpha = 0, \delta \theta = 0, \delta s = 0$.

$$\delta A_\varphi = \delta A(\vec{F}_{ц3}) + \delta A(\vec{F}_{ц4}) + \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_P) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}) + \delta A(\vec{G}_C).$$

4. Полагаем $\delta \alpha > 0$, при этом $\delta \varphi = 0, \delta \theta = 0, \delta s > 0$.

$$\delta A_\alpha = \delta A(\vec{F}_{ц1}) + \delta A(\vec{F}_{ц2}) + \delta A(\vec{F}_{ц3}) + \delta A(\vec{F}_{ц4}) + \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_P) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}) + \delta A(\vec{G}_C) + \delta A(\vec{G}_A).$$

Элементарная работа сил на каждом угловом перемещении вычисляется как произведение момента силы относительно соответствующей оси вращения на элементарный угол поворота. Для случая 2, ось вращения EZ_2 , для случая 3 - O_1Z_1 , для случая 4 - OZ . Момент силы \vec{F} относительно оси может быть вычислен с использованием векторного произведения радиуса вектора точки при-

ложения силы \vec{r} , на вектор силы \vec{F} . Вектор \vec{r} проводится из центра Е в случае 2, из центра O_1 в случае 3 и центра O в случае 4.

Поскольку наложенные на систему внешние связи считаются идеальными, в уравнения равновесия (1) не входят неизвестные реакции и эти уравнения могут быть использованы для поиска сил давления на штоках гидроцилиндров – значений

$$F_{ц1} = -\frac{1}{L \sin \alpha} \left\{ -\cos \alpha_1 (x_C G_A + x_{C_1} G_C + x_{C_P} G_P + x_{C_T} G_T + x_{6P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_C G_A + y_{C_1} G_C + y_{C_P} G_P + y_{C_T} G_T + y_{6P} G_{6P}) \right\} + F_{ц3} [x_D \sin \omega - y_D \cos \omega] + F_{ц4} [x_{D_3} \sin \beta_5 - y_{D_3} \cos \beta_5] + F_{ц5} [x_{M_2} \sin \omega - y_{M_2} \cos \omega]. \quad (2)$$

В выражении (2) L – расстояние между аутригерами; x_i, y_i – декартовы координаты точки приложения силы, $i = C, C_1, C_P, C_T, C_{D_3}, C_{M_2}, C_{6P}$.

$$F_{ц3} = -\frac{1}{[x_{1D_3} \sin \omega - y_{1D_3} \cos \omega]} \left\{ -\cos \alpha_1 (x_{1C_1} G_C + x_{1C_P} G_P + x_{1C_T} G_T + x_{16P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_{1C_1} G_C + y_{1C_P} G_P + y_{1C_T} G_T + y_{16P} G_{6P}) \right\} + F_{ц4} [x_{1D_3} \sin \beta_5 - y_{1D_3} \cos \beta_5] + F_{ц5} [x_{1M_2} \sin(\pi + \theta) - y_{1M_2} \cos(\pi + \theta)]. \quad (3)$$

Сила давления на штоке гидроцилиндра рукояти имеет вид:

$$F_{ц4} = -\frac{1}{[x_{2D_3} \sin \beta_5 - y_{2D_3} \cos \beta_5]} \left\{ -\cos \alpha_1 (x_{2C_P} G_P + x_{2C_T} G_T + x_{26P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_{2C_P} G_P + y_{2C_T} G_T + y_{26P} G_{6P}) \right\} + F_{ц5} [x_{2M_2} \sin(\pi + \theta) - y_{2M_2} \cos(\pi + \theta)]. \quad (4)$$

Сила давления на штоке гидроцилиндра стрелы выражается следующим образом:

$$F_{ц5} = -(G_T + G_{6P}) \sin(\theta - \alpha_1). \quad (5)$$

Выражения для вычисления координат точек приложения сил, используемых в уравнениях (2-5), при любом положении звеньев механизма приведены в прил. 1. В прил. 1 приведены также расчетные формулы для углов и других зависимых геометрических параметров, входящих в уравнения (2-5).

Метод исследования и результаты.

Система уравнений (2-5) позволяет выполнить последовательный расчет статических усилий, действующих на штоки гидроцилиндров манипулятора в допустимом диапазоне изменений каждой обобщенной координаты.

Анализ полученных выражений проведен применительно к возможному аналогу гидроманипулятора АТЛАНТ-С 90 (ЛВ 185-14), выпускаемому Майкопским машиностроительным заводом. Все вычисления проведены с помощью специальной программы для ЭВМ.

$F_{ц1}, F_{ц3}, F_{ц4}, F_{ц5}$. Отметим, что полученные выражения для обобщенных сил могут быть использованы для изучения динамики рассматриваемого манипулятора с учётом работы аутригеров при составлении уравнений Лагранжа 2-го рода.

Сила давления на штоке гидроцилиндра аутригера имеет вид:

Сила давления на штоке гидроцилиндра стрелы выражается следующим образом:

Геометрические константы модельного манипулятора представлены в прил. 2. Здесь же приведены значения массы отдельных элементов. Вес $\vec{G}_i = m_i \vec{g}$. Масса $m_A = m_{Авт} + m_K$.

Рис. 3-4 иллюстрируют зависимости давления в гидроцилиндрах манипулятора при различных положениях рамы, стрелы, рукояти и телескопического удлинителя. Давление жидкости в гидроцилиндрах вычисляется по формуле $p_{ци} = F_{ци}/(\pi d_{ци}^2)$, $i=1,3,4,5$. Значения диаметров внутренних цилиндров приняты следующими: $d_{ц1}=80$ мм, $d_{ц3}=140$ мм, $d_{ц4}=140$ мм, $d_{ц5}=63$ мм. Отрицательные значения давления указывают на противоположное направление соответствующего усилия на штоке по отношению к тому, которое показано на рис. 2.

Угол поворота рукояти относительно оси стрелы θ_1 изменяется от 0° до -90° . Расчеты выпол-

нены для случая полностью выдвинутого телескопического удлинителя: $s=1$ м.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости давления в гидроцилиндрах манипулятора от угла поворота стрелы относительно плоскости рамы φ_1 для случая, когда за счет, например, деформирования грунта слайсер правого аутригера занял положение А (рис. 2), так что угол $\alpha_1=15^\circ$. Угол φ_1 варьируется в диапазоне от -23° до $+80^\circ$ градусов.

Как видно из рис. 3, максимальные значения давления имеют место в гидроцилиндре аутригера. Графики на рис. 3, а указывают на опасные взаимные положения звеньев манипулятора. В условиях статического нагружения при выбранных значениях входных параметров давление $p_{ц1}$ может достигать нежелательных для работоспособности гидроцилиндра больших значений ~ 30 атм. Это происходит в предельно нижних положениях стрелы и рукояти.

Все зависимости для $p_{ц1}$ имеют минимум. Чем больше угол поворота рукояти $|\theta_1|$, тем при более высоком значении угла поворота стрелы достигается этот минимум. Вне зоны минимума, где давление в гидроцилиндре убывает, кривые, отвечающие разным положениям рукояти симбатны. При этом значения давлений $p_{ц1}$ в этой области практически одинаковы для $\theta_1=0^\circ$, -22.5° . Чем больше отклоняется рукоять от оси стрелы, тем более интенсивно нарастает давление жидкости в цилиндре аутригера. Для значений угла поворота стрелы выше, чем доставляющее минимум $p_{ц1}$, наблюдается немонотонный характер зависимости давления $p_{ц1}$ от угла поворота рукояти θ_1 .

Давление в гидроцилиндре стрелы $p_{ц3}$ при выбранных значениях входных параметров не превышает $8,5$ атм ($8,5$ МПа) в любом положении звеньев манипулятора (рис. 3, б). Максимальное значение давления $p_{ц3}$ смещается в зону больших зна-

чений угла поворота стрелы. Этот сдвиг тем значительнее, чем больше повернута рукоять (выше значение $|\theta_1|$).

Сравнивая кривые для давления в гидроцилиндрах стрелы и рукояти $p_{ц3}$ и $p_{ц4}$ на рис. 3б и 3с, можно сделать вывод об одинаковых качественных особенностях их изменения. При этом абсолютные значения давления в гидроцилиндре рукояти $p_{ц4}$ примерно в 2 раза ниже, чем в гидроцилиндре стрелы $p_{ц3}$.

Давление в гидроцилиндре телескопического удлинителя $p_{ц5}$ в рассматриваемых условиях невелико по абсолютной величине, при этом усилие в на штоке этого гидроцилиндра меняет свое направление, если положение рукояти соответствует $|\theta_1| < 22.5^\circ$ (рис. 3д). Следует также отметить симбатный характер зависимостей давления $p_{ц5}$ от угла поворота стрелы φ_1 при малых и средних значениях угла поворота рукояти $|\theta_1| < 45^\circ$.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости давления в гидроцилиндрах манипулятора от угла наклона рамы опорно-поворотного устройства по отношению к горизонту α_1 . Угол α_1 варьировался в интервале (0° - 15°). Угол поворота стрелы относительно плоскости рамы φ_1 фиксирован в положении, параллельном раме ($\varphi_1=0$).

С увеличением угла наклона опорно-поворотного устройства возрастает давление в гидроцилиндрах аутригера $p_{ц1}$ и телескопического удлинителя $p_{ц5}$ (рис. 4а и 4д) и, наоборот, убывает давление в гидроцилиндрах стрелы $p_{ц3}$ и рукояти $p_{ц4}$ (рис. 4б и 4с).

Из рис. 4а видно, что характер всех кривых $p_{ц1}(\alpha_1)$ характеризуется симбатностью. То же самое заключение справедливо для зависимостей $p_{ц3}(\alpha_1)$, $p_{ц4}(\alpha_1)$, $p_{ц5}(\alpha_1)$, кроме тех, которые относятся либо к крайним нижним (рис. 4б-4с), либо крайним верхним положениям рукояти (рис. 4д).

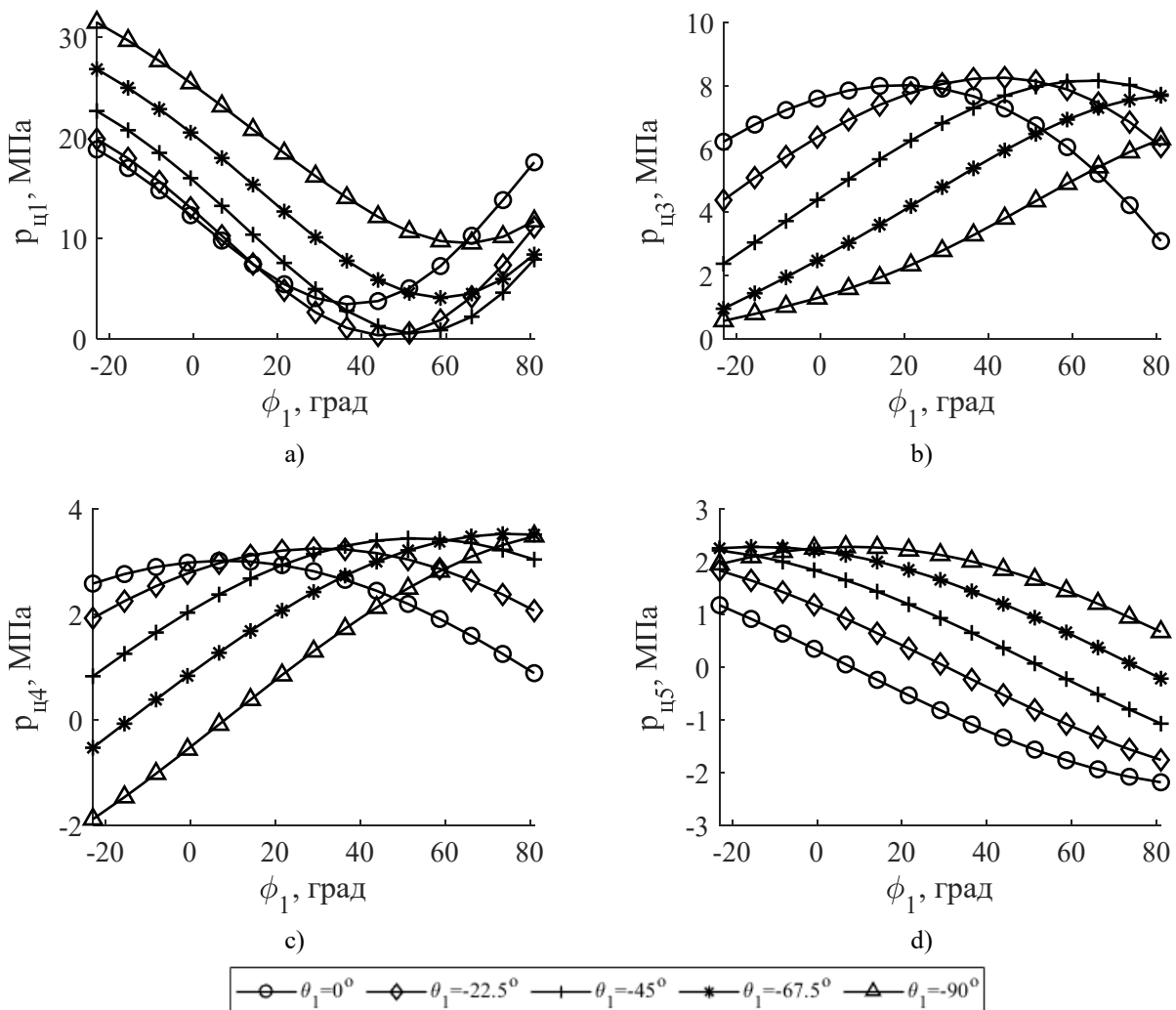


Рисунок 3. Значения давления в гидроцилиндрах 1 (для выдвижения аутригеров) – а) 3 (для изменения положения стрелы) – б); 4 (для изменения положения рукояти) – в); 5 (для выдвижения телескопической части) – г) при различных значениях углов наклона стрелы (ϕ_1) и рукояти (θ_1) при величине угла наклона рамы опорно-поворотного устройства гидроманипулятора $\alpha_1=15^\circ$. Длина выдвинутой телескопической части $s=1.0$ м

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 3. Pressure values in hydraulic cylinders 1 (for extending outriggers) – a) 3 (for changing the position of the boom) – б); 4 (for changing the position of the handle) – в); 5 (for extending the telescopic part) – г) at different values of the angles of inclination of the boom (ϕ_1) and the handle (θ_1) when the angle of inclination of the hydraulic manipulator frame is $\alpha_1=15^\circ$. The length of the extended telescopic part $s = 1.0$ m

Source: own calculations

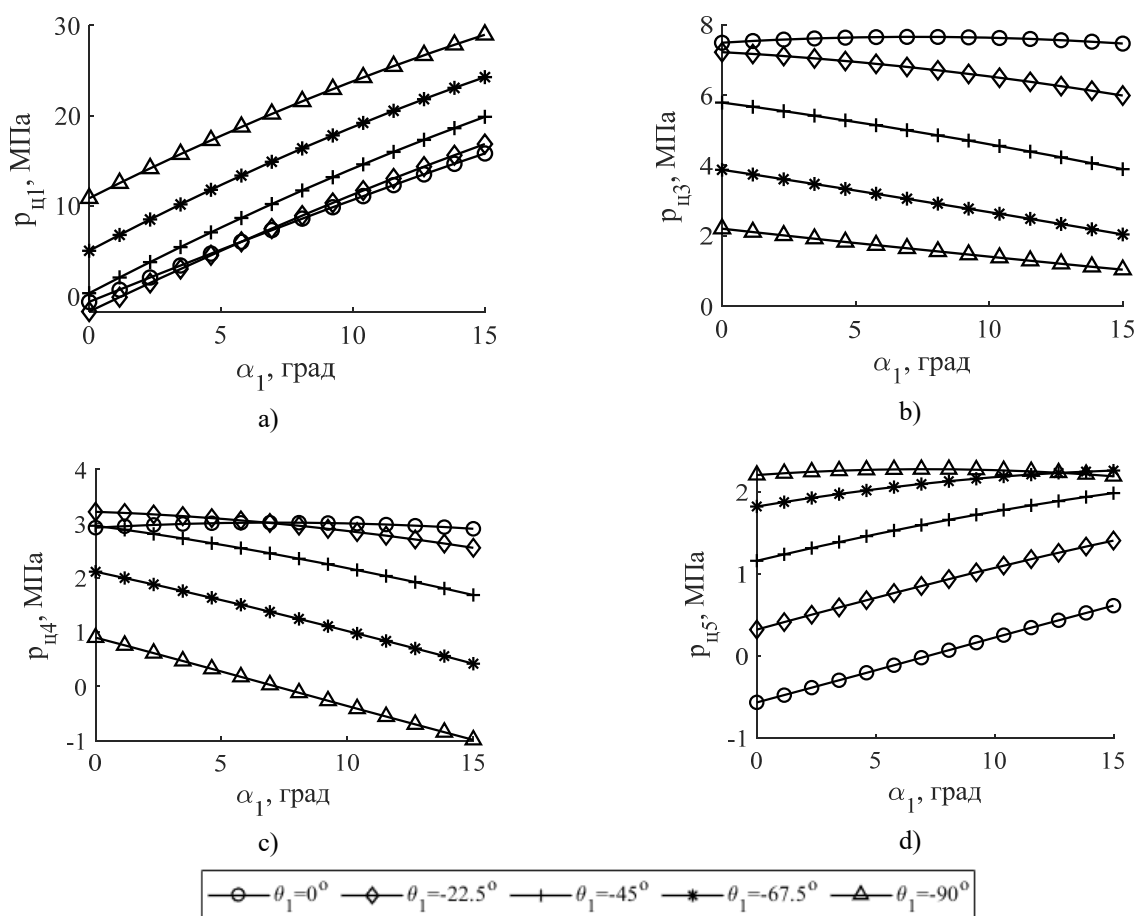


Рисунок 4. Значения давления в гидроцилиндрах 1 (для выдвижения аутригеров) – а) 3 (для изменения положения стрелы) – б); 4 (для изменения положения рукояти) – в); 5 (для выдвижения телескопической части) – г) при различных значениях углов наклона рамы опорно-поворотного устройства (α_1) и рукояти (θ_1) при величине угла наклона стрелы гидроманипулятора $\varphi_1=0^\circ$. Длина выдвинутой телескопической части $s=1.0$ м

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 4. Pressure values in hydraulic cylinders 1 (for extension of outriggers) – а) 3 (for changing the position of the boom) – б); 4 (for changing the position of the handle) – в); 5 (for extension of the telescopic part) – г) at different values of the tilt angles of the pivot frame (α_1) and the handle (θ_1) at the angle of inclination of the boom of the hydraulic manipulator $\varphi_1=0^\circ$. Length of the extended telescopic part $s=1.0$ m

Source: own calculations

Закключение

В работе получены аналитические выражения для усилий на штоках гидроцилиндров и значения давления рабочей жидкости в поршневых полостях этих гидроцилиндров в состоянии равновесия при различном положении звеньев манипулятора с четырьмя степенями свободы. Длины двух звеньев в разных положениях механизма изменяются. Расчетные формулы получены на основе уравнений равновесия в обобщенных координатах. Численный анализ зависимостей позволяет выявить взаимные положения звеньев манипулятора, кото-

рые характеризуются высоким давлением в стреловом гидроцилиндре, а также гидроцилиндрах рукояти, аутригера и телескопического удлинителя. Выражения (2-5) позволяют выполнить подбор гидроцилиндров, оптимальных по своим эксплуатационным характеристикам для осуществления операций погрузки-разгрузки сортиментов, а также прогнозировать в статическом приближении возможность безопасного выхода из критического режима манипулятора лесотранспортной машины с выведением в горизонтальное положение рамы опорно-поворотного устройства.

Приложение А. Координаты точек приложения сил в уравнениях (2-5). Выражения для определения зависимых геометрических параметров

Обозначения отрезков соответствуют рисунку 2.

$x_C = OO_2 \cos \alpha + O_2K_2 \cos \alpha_3 + C_AK_2 \cos \alpha;$ $y_C = OO_2 \sin \alpha + O_2K_2 \sin \alpha_3 + C_AK_2 \sin \alpha;$ $x_{O_1} = OO_2 \cos \alpha + O_2K_2 \cos \alpha_3 + O_1K_2 \cos \alpha;$ $y_{O_1} = OO_2 \sin \alpha + O_2K_2 \sin \alpha_3 + O_1K_2 \sin \alpha;$ $x_{C_1} = x_{O_1} + x_{1C_1}; y_{C_1} = y_{O_1} + y_{1C_1};$ $x_{C_P} = x_{O_1} + x_{1C_P}; y_{C_P} = y_{O_1} + y_{1C_P};$ $x_{C_T} = x_{O_1} + x_{1C_T}; y_{C_T} = y_{O_1} + y_{1C_T};$ $x_{C_{6P}} = x_{O_1} + x_{1C_{6P}}; y_{C_{6P}} = y_{O_1} + y_{1C_{6P}};$ $x_D = x_{O_1} + x_{1D}; y_D = y_{O_1} + y_{1D};$ $x_{D_3} = x_{O_1} + x_{1D_3}; y_{D_3} = y_{O_1} + y_{1D_3};$ $x_{M_2} = x_{O_1} + x_{1M_2}; y_{M_2} = y_{O_1} + y_{1M_2};$	$x_{1C_1} = O_1C_1 \cos \varphi; y_{1C_1} = O_1C_1 \sin \varphi;$ $x_{1C_P} = x_{2C_P} + O_1E \cos \varphi; y_{1C_P} = y_{2C_P} + O_1E \sin \varphi;$ $x_{1C_T} = x_{2C_T} + O_1E \cos \varphi; y_{1C_T} = y_{2C_T} + O_1E \sin \varphi;$ $x_{1C_{6P}} = x_{2C_{6P}} + O_1E \cos \varphi;$ $y_{1C_{6P}} = y_{2C_{6P}} + O_1E \sin \varphi;$ $x_{1D} = O_1D \cos \varphi; y_{1D} = O_1D \sin \varphi;$ $x_{1D_3} = O_1D_4 \cos \varphi + D_4D_3 \cos \beta_2;$ $y_{1D_3} = O_1D_4 \sin \varphi + D_4D_3 \sin \beta_2;$ $x_{1M_2} = x_{2M_2} + O_1E \cos \varphi;$ $y_{1M_2} = y_{2M_2} + O_1E \sin \varphi;$
$x_{2C_P} = EC_P \cos \theta; y_{2C_P} = EC_P \sin \theta;$ $x_{2C_T} = EC_T \cos \theta; y_{2C_T} = EC_T \sin \theta$ $ EC_T = EM_3 + s - T/2;$ $x_{2C_{6P}} = EK \cos \theta + KC_{6P} \cos \left(\frac{3\pi}{2} + \alpha_1\right);$ $y_{2C_{6P}} = EK \sin \theta + KC_{6P} \sin \left(\frac{3\pi}{2} + \alpha_1\right);$	$ EK = EM_3 + s + M'_2K ;$ $x_{2M_2} = EM'_2 \cos \theta + M'_2M_2 \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right);$ $y_{2M_2} = EM'_2 \sin \theta + M'_2M_2 \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right);$ $ EM'_2 = EM_3 + s;$ $x_{2D_3} = ED_3 \cos(\theta + \gamma_6); y_{2D_3} = ED_3 \sin(\theta + \gamma_6);$
$\alpha_1 = \pi/2 + \tilde{\alpha} - \alpha; \alpha_3 = \tilde{\alpha} - \alpha_1;$ $\gamma_1 = \pi - \varphi + \theta; \theta < 0;$ $\gamma_6 = 2\pi - (\gamma_1 + \gamma_5);$ $\gamma_5 = \arcsin[z_1 \sin \beta_2 / ED_3];$ $ ED_3 = [z_1^2 + z_2^2 - 2z_1z_2 \cos \beta_2]^{1/2};$ $\gamma_4 = \arcsin(z'_2 \sin \gamma_1 / y_5);$ $\gamma_3 = \arcsin(z'_1 \sin \gamma_2 / y_5);$ $\gamma_2 = \arccos[(y_2 - y_1 - y_4 \cos \gamma_1) / (-y_3)];$ $y_1 = z_1^2 + z_1'^2; y_2 = z_2^2 + z_2'^2;$ $y_3 = 2z_1z_1'; y_4 = 2z_2z_2';$ $y_5 = [z_2^2 + z_2'^2 - 2z_2z_2' \cos \gamma_1]^{1/2}$ $\beta_5 = 2\pi - \beta_3 - \beta_4; \beta_4 = \pi - \varphi - \beta_2;$ $\beta_3 = \arcsin[D_5D_4 / D_5D_3 \sin(\pi - \beta_1 - \beta_2)];$ $\beta_2 = \gamma_3 - \gamma_4;$ $\beta_1 = \arcsin[D_2D_5 / (D_2D_5 ^2 + D_2D_4 ^2)^{1/2}];$	$ D_5D_3 = [D_5D_4 ^2 + z_1^2 - 2 D_5D_4 z_1 \cos(\pi - \beta_1 - \beta_2)]^{1/2};$ $ D_5D_4 = [D_2D_5 ^2 + D_2D_4 ^2]^{1/2};$ $\omega = \pi/2 - (\delta - \alpha_3) + \varphi;$ $\delta = \pi/2 - \nu_5;$ $\nu_5 = \pi - \nu_4 - \nu_6;$ $\nu_6 = \arcsin(O_1I_1 / I_1I_2 \sin \nu_3);$ $ I_1I_2 = [O_1I_1 ^2 + O_1I_2 ^2 - 2 O_1I_1 O_1I_2 \cos \nu_3]^{1/2};$ $\nu_4 = \arcsin(O_1C / O_1I_2);$ $ O_1I_1 = (z_4^2 + O_1D ^2)^{1/2};$ $ O_1I_2 = (z_3^2 + O_1C ^2)^{1/2};$ $\nu_3 = \pi/2 + \varphi - \alpha_3 - \nu_1 - \nu_2;$ $\nu_2 = \arctg(z_3 / O_1C);$ $\nu_1 = \arctg(z_4 / O_1D);$

Приложение Б. Массовые и геометрические характеристики системы

Таблица Б.1

Массовые характеристики механической системы

Table B.1

Mass characteristics of the mechanical system

Обозначение	Параметр	Значение, кг
m_K	масса рамы, поворотной колонны гидроманипулятора, гидроцилиндра и механизма привода стрелы	1070
$m_{бр}$	масса бревен с грейфером и ротатором	575
m_C	масса стрелы с гидроцилиндром и механизмом привода рукояти	325
m_P	масса рукояти без телескопического удлинителя с гидроцилиндром привода телескопического удлинителя	225
m_T	масса телескопического удлинителя	150
$m_{Авт}$	масса автомобиля	21000

Таблица Б.2

Геометрические характеристики механической системы. Обозначения отрезков соответствуют рис. 2

Table B.2

Geometric characteristics of the mechanical system. The segment designations correspond to Figure 2

Обозначение	Примечание	Значение, мм
<i>Зона стрелы манипулятора</i>		
O_1E	Длина стрелы	4300
O_1C_1	C_1 - центр тяжести стрелы с гидроцилиндром и механизмом привода рукояти	2100
O_1D_2		2455
O_1D		660
D_2D_4		1370
D_2D_5		300
z_1, z'_1	Элементы привода рукояти	546, 800
z_2, z'_2	Элементы привода рукояти	475, 305
z_3, z_4	Элементы привода стрелы	320, 200
<i>Зона рукояти и телескопической части манипулятора</i>		
EM_3	Длина рукояти	2300
T	Длина телескопического удлинителя (максимальная)	1000
$M_2'K$		200
$M_2'M_2$		0
EC_P	C_P - центр тяжести рукояти без телескопического удлинителя с гидроцилиндром привода телескопического удлинителя	1000
$KC_{бр}$		1000
<i>Автомобиль и колонна манипулятора</i>		
$OA=L$	Расстояние между аутригерами. $OA = O_2O_3$. $O_2K_2 = K_2O_3$.	3800
OO_2	Высота левого аутригера, установленного в рабочее положение	1500
O_1K_2	Высота колонны	1915
O_1C	C – центр тяжести автомобиля вместе с опорно-поворотным устройством и колонной	1220

Список литературы

1. Попиков, П. И. Повышение эффективности погрузочно-разгрузочных работ гидроманипуляторов лесотранспортных машин с выравнителями опорных платформ / П. И. Попиков, П. В. Танчук // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 4, № 4(30). – С. 95–100. – URL: <https://elibrary.ru/zlqwqi>.
2. Имитационная модель автомобильного манипулятора, реализованная в среде САПР / П. И. Попиков, В. А. Зеликов, К. А. Яковлев [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 4 (36). – С. 142–150. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/16. – URL: <https://elibrary.ru/qwhvkvf>.
3. Лагерев, А. В. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов : Моделирование рабочих процессов и проектирование элементов гидропривода / А. В. Лагерев, И. А. Лагерев. – Брянск, 2019. – 201 с. – ISBN 978-5-9734-0319-5. – URL: <https://elibrary.ru/vleqjy>.
4. Проектирование аутригеров для испытаний устойчивости транспортных средств / В. Г. Крясков, А. С. Вашурин, А. В. Тумасов, А. А. Васильев // Фундаментальные исследования; 2017: 3. 40–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29007768>.
5. Лагерев, И. А., Лагерев А. В. Повышение безопасности эксплуатации мобильных транспортно-технологических машин с манипуляционными системами при работе с аутригерами. Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017; 3: 296–302. – DOI 10.22281/2413-9920-2017-03-03-296-302. – URL: <https://elibrary.ru/yqibmt>.
6. Сладкова Л. А., Григорьев П. А., Крылов В. В. Моделирование усилий в опорах машин основного технологического назначения на примере стрелового самоходного крана. Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019; 4: 516-522. – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-04-516-522. – URL: <https://elibrary.ru/lunhus>.
7. Селиверстов Г. В., Ситников С. В., Цолин А. С. Разработка конструкций аутригеров для работы автокранов в малосвязных грунтах. Механика XXI века. 2021; 20: 169-172. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46260333>.
8. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator / S. Glushkov, A. Rybak, P. Popikov [et al.] // Forestry engineering journal. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – P. 88-99. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8. – URL: <https://elibrary.ru/kjpbmt>.
9. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления / Е. Н. Власов, А. В. Сергеевичев, Ю. А. Добрынин, В. В. Сергеевичев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 238. – С. 99-112. – DOI 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. – URL: <https://elibrary.ru/bgxkeo>.
10. Попиков П. И., Юдин Р. В., Танчук П. В., Конюхов А. В. Математическая модель динамических режимов гидроманипуляторов лесотранспортных машин с выравнителями опорных платформ. Resources and Technology. 2021; 18(1): 140-155. – DOI 10.15393/j2.art.2021.5623.
11. Танчук П. В., Попиков П. И., Евсиков И. Д. Повышение устойчивости лесотранспортных машин при применении выравнителей опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов // Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. – Воронеж, 2022: 62-68. – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_62-68.
12. Патент № 2762905 С1 Российская Федерация, МПК В66С 23/80, В66С 13/18, А01G 23/00. Гидросистема механизма выравнивания опорно-поворотного устройства гидроманипулятора лесотранспортной машины : № 2021116628 : заявл. 07.06.2021 : опубл. 23.12.2021 / П. И. Попиков, П. В. Танчук, В. П. Попиков, Р. В. Юдин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

13. Improved inverse kinematics and dynamics model research of general parallel mechanisms / X. Zhang, H. Wang, Y. Rong et al. // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2023. – Vol. 37. – № 2. – P. 943–954. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0134-1>.
14. Лагереv И. А., Остроухов И. О., Химич А. В. Компьютерное моделирование процесса потери общей устойчивости мобильной машины, оснащенной стреловой манипуляционной системой. 2019; 1: 83-94. – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94. – URL: <https://elibrary.ru/ihfpoq>.
15. Голякевич С. А. Гороновский А. Р., Мохов С. П. Результаты имитационного моделирования работы гидравлической системы форвардера в MATLAB / Simulink / Simscape. Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019; 1(216): 126–131. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36955660>.
16. Zhou, H. A practical method for the deformation of long-stroke hydraulic manipulators in grasping-handling tasks / H. Zhou, X. Zhang, J. Liu // *Journal of Field Robotics*. – 2023. – Vol. 40. – № 4. – P. 862–878. – DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22160>.
17. Vihonen, J. Joint-Space Kinematic Model for Gravity-Referenced Joint Angle Estimation of Heavy-Duty Manipulators / J. Vihonen, J. Mattila, A. Visa // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2018. – Vol. 66. – № 12. – P. 3280-3288. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2749918>.
18. Hierarchical Decoupling Controller With Cylinder Separated Model of Hydraulic Manipulators for Contact Force/Motion Control / J. Shen, J. Zhang, H. Zong et al. // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2023. – Vol. 28. – № 2. – P. 1081-1092. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3213582>.
19. Reducing Amplitude of Load Swinging During Operation of Hydraulic Manipulators of Forest Transport Machines / M. Drapalyuk [et al.] // *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham, 2020. P. 595-608. DOI:10.1007/978-3-030-22063-1_63.
20. Модель определения времени наведения захватно-срезающего устройства валочно-пакетирующих машин на растущее дерево / А. В. Андронов, И. А. Зверев, О. А. Михайлов, Г. С. Тарадин // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2021. – № 237. – С. 183-195. – DOI 10.21266/2079-4304.2021.237.183-195. – <https://elibrary.ru/gnazvg>.
21. Борисов А. В., Филиппенков К. Д. Моделирование движения звена переменной длины робота-манипулятора с использованием электроприводов. Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021; 9-10(159-160): 19-26. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47112565>.
22. Алхаддад М. Моделирование и управление движением манипулятора с замкнутой кинематической цепью и линейным приводом. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2021; 3: 168-176. – DOI 10.31857/S0002338821020025.
23. Zhang Y., Ding W., Deng H. Reduced Dynamic Modeling for Heavy-Duty Hydraulic Manipulators with Multi-Closed-Loop Mechanisms. *IEEE Access*. 2020; 8: 101708-101720. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998058.
24. Hoang, D. Adaptive cooperation of optimal linear quadratic regulator and lumped disturbance rejection estimator-based tracking control for robotic manipulators / D. Hoang, N.T. Pham, X.H. Le et al. // *International Journal of Dynamics and Control*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-023-01144-2>.
25. Yan Ch., Shi K., Zhang H., Yao Y. Simulation and analysis of a single actuated quadruped robot. *Mechanical Sciences*. 2022. 13:137-146. DOI 10.5194/ms-13-137-2022.
26. Дуюн И.А., Горлов А.С., Дуюн Т.А. Совместное моделирование движения параллельного манипулятора с использованием Adams-Matlab. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022; 11: 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119.

27. Nurmi J., Mattila, J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators: Experimental Results for a Forestry Manipulator. *Energies*. 2017; 10(5): 647. DOI:10.3390/en10050647.

28. Jung, S. Improvement of Tracking Control of a Sliding Mode Controller for Robot Manipulators by a Neural Network / S. Jung // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2018. – Vol. 16. – № 2. – P. 937-943. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0186-z>.

29. Бартенеv, И. М. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин / И. М. Бартенеv, Е. В. Поздняков // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 3 (11). – С. 114–123. – <https://elibrary.ru/rqqpeb>.

References

1. Popikov, P. I. Improving the efficiency of loading and unloading operations of hydraulic manipulators of forest transport machines with levelers of support platforms / P. I. Popikov, P. V. Tanchuk // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2019. – Vol. 4, No. 4(30). – P. 95-100. – URL: <https://elibrary.ru/zlqwqi>.

2. Simulation model of an automobile manipulator implemented in a CAD environment / P. I. Popikov, V. A. Zelikov, K. A. Yakovlev [et al.] // *Forestry Journal*. – 2019. – Vol. 9, No. 4(36). – pp. 142-150. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/16. – URL: <https://elibrary.ru/qwhvxf> (In Russian).

3. Lagerev, A.V. Modern theory of manipulation systems of mobile multipurpose transport and technological machines and complexes: Modeling of work processes and design of hydraulic drive elements / A. V. Lagerev, I. A. Lagerev. – Bryansk, 2019. – 201 p. – ISBN 978-5-9734-0319-5. (In Russian). – URL: <https://elibrary.ru/vleqjy>.

4. Proektirovanie autrigrerov dlya ispytaniy ustojchivosti transportnyh sredstv / Kryaskov V. G., Vashurin A. S., Tumasov A. V., Vasil'ev A. A. *Fundamental'nye issledovaniya*; 2017: 3. 40-47. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29007768>.

5. Lagerev I. A., Lagerev A. V. Povyshenie bezopasnosti ekspluatatsii mobil'nyh transportno-tekhnologicheskikh mashin s manipulyacionnymi sistemami pri rabote s autrigrerami. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017; 3: 296-302. (In Russian). – DOI 10.22281/2413-9920-2017-03-03-296-302.

6. Sladkova L. A., Grigor'ev P. A., Krylov V. V. Modelirovanie usilij v oporah mashin osnovnogo tekhnologicheskogo naznacheniya na primere strelovogo samohodnogo krana. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019; 4: 516-522. (In Russian). – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-04-516-522.

7. Seliverstov G. V., Sitnikov S. V., Colin A. S. Razrabotka konstrukcij autrigrerov dlya raboty avtokranov v malosvyaznyh gruntah. *Mekhaniki XXI veku*. 2021; 20: 169-172. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46260333>.

8. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator / S. Glushkov, A. Rybak, P. Popikov [et al.] // *Forestry engineering journal*. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – P. 88-99. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/kjpbmt>.

9. Analysis of the operation of a hydraulic manipulator of a forest machine with a cyclic control system / E. N. Vlasov, A.V. Sergeevichev, Yu. A. Dobrynin, V. V. Sergeevichev // *Izvestia of the St. Petersburg Forestry Technical Academy*. – 2022. – No. 238. – pp. 99-112. – DOI 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. – Access mode: <https://elibrary.ru/bgxkeo>.

10. Popikov P. I., YUdin R. V., Tanchuk P. V., Konyuhov A. V. Matematicheskaya model' dinamicheskikh rezhimov gidromanipulyatorov lesotransportnyh mashin s vyravnivatelyami opornyh platform. *Resources and Technology*. 2021; 18(1): 140-155. – DOI 10.15393/j2.art.2021.5623.

11. Tanchuk P. V., Popikov P. I., Evsikov I. D. Povyshenie ustojchivosti lesotransportnyh mashin pri primenenii vyravnivatelej oporno-povorotnyh ustrojstv gidromanipulyatorov. *Sovremennyy lesnoj kompleks strany: problemy i trendy razvitiya: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Voronezh, 07 oktyabrya 2022 goda* /

Otv. redaktor A.A. Platonov. – Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova; 2022: 62-68. (In Russian). – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_62-68.

12. Patent № 2762905 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK B66C 23/80, B66C 13/18, A01G 23/00. Gidrosistema mekhanizma vyravnivaniya oporno-povorotnogo ustrojstva gidromanipulyatora lesotransportnoj mashiny : № 2021116628 : zayavl. 07.06.2021 : opubl. 23.12.2021 / P. I. Popikov, P. V. Tanchuk, V. P. Popikov, R. V. Yudin ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet imeni G.F. Morozova".

13. Dobrachev A. A., Raevskaya L. T., SHvec A. V. Kinematicheskie skhemy, struktury i raschet parametrov lesopromyshlennyh manipulyatornyh mashin : monografiya. – Ekaterinburg : federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Ural'skij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet", 2014: 128. – ISBN 978-5-94984-450-2. (In Russian).

14. Lagerev I. A., Ostrouhov I. O., Himich A. V. Komp'yuternoe modelirovanie processa poteri obshchej ustojchivosti mobil'noj mashiny, osnashchennoj strelovoj manipulyacionnoj sistemoj. 2019; 1: 83-94. (In Russian). – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94.

15. Golyakevich S. A. Goronovskij A. R., Mohov S. P. Rezul'taty imitacionnogo modelirovaniya raboty gidravlicheskoj sistemy forvardera v MATLAB / Simulink / Simscape. Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov. 2019; 1(216): 126-131. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36955660>.

16. Zhou, H. A practical method for the deformation of long-stroke hydraulic manipulators in grasping-handling tasks / H. Zhou, X. Zhang, J. Liu // Journal of Field Robotics. – 2023. – Vol. 40. – № 4. – P. 862-878. – DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22160>.

17. Vihonen, J. Joint-Space Kinematic Model for Gravity-Referenced Joint Angle Estimation of Heavy-Duty Manipulators / J. Vihonen, J. Mattila, A. Visa // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – Vol. 66. – № 12. – P. 3280-3288. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2749918>.

18. Shen, J. Hierarchical Decoupling Controller With Cylinder Separated Model of Hydraulic Manipulators for Contact Force/Motion Control / J. Shen, J. Zhang, H. Zong et al. // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2023. – Vol. 28. – № 2. – P. 1081-1092. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3213582>.

19. Popikov P., Drapalyuk M., Druchinin D. Reducing Amplitude of Load Swinging During Operation of Hydraulic Manipulators of Forest Transport Machines. International Conference on Industrial Engineering. Springer, Cham, 2020. P. 595–608. DOI:10.1007/978-3-030-22063-1_63.

20. A model for determining the time of guidance of a grabbing-cutting device of felling-packing machines on a growing tree / A.V. Andronov, I. A. Zverev, O. A. Mikhailov, G. S. Taradin // Izvestiya of the St. Petersburg Forestry Academy. - 2021. – No. 237. – pp. 183-195. – DOI 10.21266/2079-4304.2021.237.183-195. – <https://elibrary.ru/gnazvvg>.

21. Borisov A. V., Filippenkov K. D. Modelirovanie dvizheniya zvena peremennoj dliny robota-manipulyatora s ispol'zovaniem elektroprivodov. Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2021; 9-10(159-160): 19-26. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47112565>.

22. Alhaddad M. Modelirovanie i upravlenie dvizheniem manipulyatora s zamknutoj kinematicheskoj cep'yu i linejnym privodom. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya. 2021; 3: 168-176. (In Russian). – DOI 10.31857/S0002338821020025.

23. Zhang Y., Ding W., Deng H. Reduced Dynamic Modeling for Heavy-Duty Hydraulic Manipulators with Multi-Closed-Loop Mechanisms. IEEE Access. 2020; 8: 101708-101720. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998058.

24. Hoang, D. Adaptive cooperation of optimal linear quadratic regulator and lumped disturbance rejection estimator-based tracking control for robotic manipulators / D. Hoang, N.T. Pham, X.H. Le et al. // International Journal of Dynamics and Control. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-023-01144-2>.

25. Yan Ch., Shi K., Zhang H., Yao Y. Simulation and analysis of a single actuated quadruped robot. Mechanical Sciences. 2022. 13:137-146. DOI 10.5194/ms-13-137-2022.

26. Duyun I.A., Gorlov A.S., Duyun T.A. Sovmestnoe modelirovanie dvizheniya parallel'nogo manipulyatora s ispol'zovaniem Adams-Matlab. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2022; 11: 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119. (In Russian).

27. Nurmi J., Mattila, J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators: Experimental Results for a Forestry Manipulator. Energies. 2017; 10(5): 647. DOI:10.3390/en10050647.

28. Jung, S. Improvement of Tracking Control of a Sliding Mode Controller for Robot Manipulators by a Neural Network / S. Jung // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2018. – Vol. 16. – № 2. – P. 937-943. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0186-z>.

29. Bartenev, I. M. The wearing capacity of soils and its effect on the durability of working bodies of tillage machines / I. M. Bartenev, E. V. Pozdnyakov // Forestry Engineering Journal. – 2018. – № 3(11). – P. 114-123. – <https://elibrary.ru/rqqpeb> (in Russian).

Сведения об авторах

✉ *Дорняк Ольга Роальдовна* – доктор техн. наук, зав. кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>; e-mail: ordornyak@mail.ru

Маркова Людмила Васильевна – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории реофизики и макрокинетики Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Беларусь, e-mail: l_v_markova@mail.ru

Попиков Сергей Константинович – Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, Российская Федерация, 394055, <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>; e-mail: sergropikov@mail.ru

Танчук Павел Владимирович – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: pavlentpv@mail.ru

Information about authors

✉ *Dorniyak Olga Roaldovna* – Dr. Sci. in Technical, Head of the department of electrical equipment, heating engineers and hydraulics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>; e-mail: ordornyak@mail.ru

Markova Ludmila Vasilyevna - candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher of Rheo-physics and Macrokinetics lab A. V. Luikov Heat and mass transfer institute of the national academy of sciences of Belarus, Brovki str., 15, Minsk, 220072, Belarus, e-mail: l_v_markova@mail.ru

Popikov Sergey Konstantinovich - Head of the group, Institute for Integrated Design of Highways, Deputatskaya str., 11, Voronezh, Russian Federation, 394055, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, sergpopikov@mail.ru

Tanchuk Pavel Vladimirovich – Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: pavlentpv@mail.ru