

DOI: 10.15393/j2.art.2025.9043

УДК 630*377.2

Статья

Моделирование рабочих процессов бесчokerного трелёвочного агрегата с гидроприводом рекуперации энергии

Дерепаско Иван Викторович

аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), derepaskoiv@mail.ru

Попиков Петр Иванович

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), popikovpetr@yandex.ru

Полукаров Денис Анатольевич

аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), aviatortut@mail.ru

Черных Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), as-utu@mail.ru

Мануковский Андрей Юрьевич

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), mayu1964@mail.ru

Абрамов Виталий Викторович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), vitali1980a@yandex.ru

Савченко Станислав Игоревич

аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), savchenko.stas2020@yandex.ru

Получена: 3 октября 2025 / Принята: 30 октября 2025 / Опубликовано: 11 ноября 2025

Аннотация: В статье проведён анализ исследований динамики гидропривода технологического оборудования. Анализ работ по исследованию повышения

энергоэффективности гидропривода лесотранспортных машин показал малое количество подобных исследований применительно к бесчокерным трелёвочным агрегатам, недостаточный анализ применения гидроаккумуляторов в конструкции их подъёмных механизмов. В процессе анализа были определены методы математического моделирования динамики предлагаемого устройства. Целью настоящей работы является снижение гидравлических нагрузок и повышение энергоэффективности бесчокерного трелёвочного агрегата путём изменения в его конструкции, а также обоснование параметров гидропривода с системой рекуперации энергии с помощью математического моделирования. Были построены зависимости функций вертикального перемещения, угла наклона агрегата и давления жидкости в системе рекуперации на основании проведённых расчётов. Для проверки адекватности математической модели рабочих процессов перспективного энергосберегающего гидропривода трелёвочного захвата проведены предварительные лабораторные испытания, в результате которых получены экспериментальные зависимости давления рабочей жидкости в гидроприводе рекуперации, аналогичные с теоретическими. В ходе испытаний выяснено, что при использовании представленной в работе кинематической и гидравлической схемы трелёвочного агрегата энергосбережение может составить до 48 кДж за один цикл трелёвки, т.е. произойдёт снижение энергозатрат на 10 %. Сравнительный анализ работы трелёвочного агрегата по производительности до и после изменения его конструкции показал, что объём выпадаемой из захвата древесины за час работы МТЗ-82 + ПТН-0,8 составляет 0,933 м³. В результате реализации предложенных решений по совершенствованию его конструкции наблюдается рост часовой (с 3,47 до 4,2 м³) и сменной производительности (с 22,27 до 26,9 м³) при расстоянии трелёвки 270 м на уровне 17 %.

Ключевые слова: трелёвка леса; рубки ухода; трелёвочный захват; сортименты; моделирование; коэффициент податливости; гидроцилиндр рекуперации

DOI: 10.15393/j2.art.2025.9043

Article

Title of the Paper Modeling of working processes of a chokerless skidding unit with a hydraulic drive for energy recovery

Ivan Derepasko

Ph. D. student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), derepaskoiv@mail.ru

Petr Popikov

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), popikovpetr@yandex.ru

Denis Polukarov

Ph. D. student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), aviatortut@mail.ru

Alexander Chernykh

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), umu@mail.ru

Andrey Manukovsky

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), mayu1964@mail.ru

Vitaly Abramov

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), vitali1980a@yandex.ru

Stanislav Savchenko

Ph. D. student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), savchenko.stas2020@yandex.ru

Received: 3 October 2025 / Accepted: 30 October 2025 / Published: 11 November 2025

Abstract: The article analyzes the studies of the hydraulic drive dynamics of process equipment. Analysis of research aimed at increasing the energy efficiency of the hydraulic drive of forestry machines showed lack of such studies concerning

chokerless skidding units. Also the use of hydraulic accumulators in the design of lifting mechanisms for energy recovery has not been studied thoroughly enough. The analysis also helped to determine the methods of mathematical modeling of the proposed device dynamics. The purpose of this work was to increase the energy efficiency of a chokerless skidding unit by substantiating the parameters of a hydraulic drive with energy recovery. The solution to the mathematical model of the working process of a chokerless skidding unit was obtained by constructing a cyclic algorithm in the Excel software product. This program allowed the authors to construct the dependencies of the functions of vertical movement, the angle of inclination of the unit and the pressure of the liquid in the recovery system based on the calculations performed. To check the adequacy of the mathematical model of the working processes of the energy-saving hydraulic drive of the skidding grapple for aggregation with the MTZ-82 tractor, preliminary laboratory tests were performed and experimental dependencies of the working fluid pressure in the recuperation hydraulic drive similar to the theoretical ones were obtained. With a stump density of 200 pcs/km in the felling area, 60 collisions of the skidding bundle of assortments may occur with an average skidding distance of 300 m. Therefore, energy savings with a skidding bundle weight of 600 kg and an amplitude of unit oscillations of 0.2 m can be 48 kJ per skidding cycle, i. e. the reduction in energy costs reached 10 %. A comparative analysis of the performance of the skidding unit, before and after changing its structure, showed that the volume of wood falling out of the capture per hour of operation of MTZ-82 + PTN-0.8 was 0.933 m³. The implementation of the proposed solutions resulted in an increase by 17% in hourly (from 3.47 to 4.2 m³) and shift productivity (from 22.27 to 26.9 m³) at a skidding distance of 270 m.

Keywords: forest skidding; thinning; skidding grab; logs; modeling; compliance factor; recovery hydraulic cylinder

1. Введение

Российская лесная промышленность активно внедряет механизацию лесозаготовок, повышая эффективность предприятий. С целью экономической эффективности особое внимание уделяется энергосбережению при трелёвке леса [1]. В России, наряду со специализированными машинами (харвестерами и форвардерами), широко используются трелёвочные агрегаты на базе обычных тракторов [2]. Последние более популярны среди небольших предприятий, поскольку использование специализированной техники для них экономически нецелесообразно [3]. На фото 1 представлены наиболее современные трелёвочные агрегаты, применяемые в РФ.

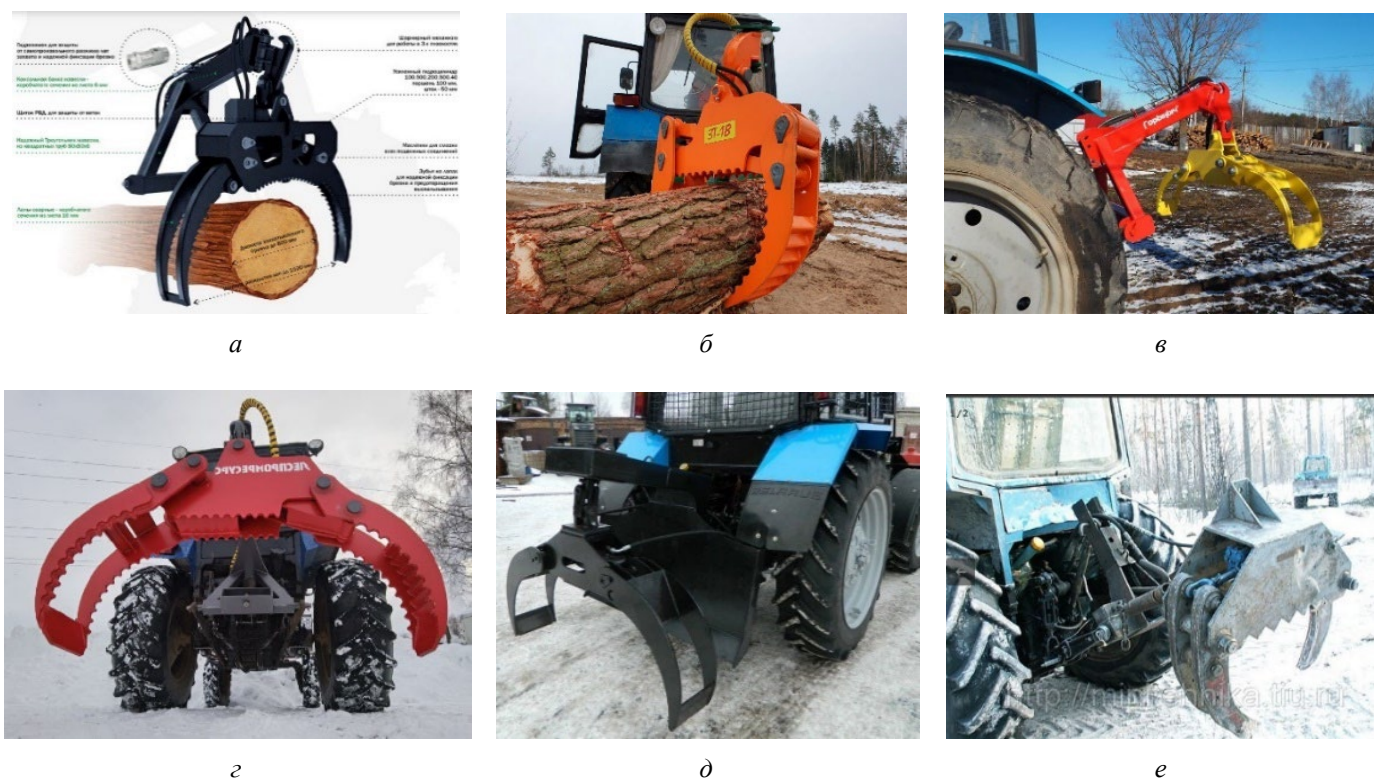


Фото 1. Трелёвочные приспособления для агрегатирования с тракторами МТЗ-82: *а* — бревнозахват трелёвочный УТ-800 М Добрыня; *б* — бревнозахват трелёвочный ЗТ-18; *в* — захват трелёвочный Горыныч-800; *г* — захват лесной трелёвочный ЛТЗ-140; *д* — захват брёвен челюстной ЗБН-1500; *е* — приспособление трелёвочное навесное ПТН-0,8 [фото авторов]

Photo 1. Skidding devices for mounting with MTZ-82 tractors: **(a)** log skidder UT-800 M Dobrynya; **(b)** log grabber ZT-18; **(c)** skidding gripper Gorynych-800; **(d)** forest skidding grip LTZ-140; **(e)** gripping logs with jaw ZBN-1500; **(f)** mounted skidding device PTN-0.8

Их общим конструктивным недостатком является отсутствие возможности гасить колебания от перемещений по неровностям местности, аккумулировать энергию колебаний и направлять её на нужды гидропривода. Это стимулирует исследования по повышению энергоэффективности таких агрегатов. Гидропривод, ключевой элемент лесозаготовительной техники, нуждается в модернизации для увеличения её эффективности. Следовательно, целью данного исследования является снижение гидравлических нагрузок и повышение энергоэффективности бесчokerного трелёвочного агрегата путём изменения в его конструкции, а также обоснование параметров гидропривода с системой рекуперации энергии с помощью математического моделирования.

Проанализированы работы российских и зарубежных авторов на данную тему.

В статье Р. В. Юдина и соавт. [4] обосновывается необходимость улучшения математического моделирования гидродинамики трелёвочных агрегатов. Скачки давления снижают прочность конструкции. Текущий метод повышения надёжности через коэффициент безопасности, компенсирующий динамические нагрузки, неточен. Требуется моделирование с учётом перемещений поршня гидроцилиндра, изменений объёма и давления, движения стрелы и перетекания жидкости.

Анализ испытаний, проведённый в работах [5—6], выявляет резкие скачки давления в гидросистеме при разгоне и торможении подвижных частей. Для решения данной проблемы необходимо разработать физико-математическую модель, которая позволит оценить влияние расположения гидроцилиндров на общую эффективность работы. Таким образом, становится возможным повысить эффективность гидроприводов через изменение надёжности и энергоёмкости.

В работе [7] авторы предлагают использование гидроаккумулятора в гидроприводе манипулятора автосортиментовоза. Математическое моделирование с учётом объёмной жёсткости рекуперативного привода позволило получить зависимости давления в гидросистеме от режима работы и подтвердило эффективность использования гидроаккумулятора.

В исследовании [8] автор разработал новую имитационную модель лесозаготовки с учётом свойств древостоев, форм лесосеки и состава техники с энергосберегающим гидроприводом.

В статье [9] представлена методика оптимального проектирования гидроманипуляторов для работы в экстремальных условиях (низкие температуры, аварийно-спасательные операции). Авторы предлагают структуру и алгоритмы оптимизации компоновки манипулятора. Методика позволяет рассчитать параметры гидросистемы и оптимизировать конструкцию по критериям минимизации массы, объёма гидроцилиндра и энергопотребления.

В исследовании [10] Д. С. Богданов и соавт. разработали математическую модель, центральным элементом которой является учёт влияния дополнительного демпфера на кинематику и динамику подъёма стрелы. Модель устанавливает взаимосвязь между углом подъёма, давлением в гидросистеме и ходом плунжера демпфера. Решение математической

модели показало снижение динамической нагруженности и повышение производительности гидропривода лесного манипулятора.

С. А. Голякевич и соавт. описали методику прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин [11]. Данная методика представляет собой набор структурных блоков, каждый из которых описывает отдельные критерии эксплуатации. Однако особое внимание уделяется моделированию рабочих процессов лесозаготовительных машин. С. А. Голякевич и соавт. также были разработаны математические модели [12], [13] для харвестеров, форвардеров и многооперационных лесных машин. Данные модели основаны на кинематических уравнениях подъёма стрелы манипулятора и перемещения машины по лесосеке со случайным расположением сортиментов. Данные математические уравнения позволяют с использованием имеющейся методики прогнозировать эффективность используемой конструкции в лесных условиях.

В исследовании [14] И. Д. Евсиков и соавт. разработали математическую модель динамики движения стрелы лесного манипулятора с гидроприводом. Целью исследования является демонстрация применения законов механики для математического моделирования подобных агрегатов при анализе их функционирования с помощью решения модели на ЭВМ. Также расчётная схема имеет кинематическую модернизацию, в результате которой пиковые давления в гидросистеме снижаются в 3 раза.

Компьютерное моделирование, проведённое В. И. Посметьевым и соавт. [15], позволило установить оптимальные параметры гидроцилиндра рекуперации энергии седельно-сцепного устройства лесовозного автопоезда.

Работа Н. Е. Саковича, А. С. Шилина [16] посвящена исследованию повышения эффективности агрегатов путём использования регулируемого гидропривода с электрогидравлическим управлением. Предложена математическая модель электрогидравлического устройства клапанного типа. В результате математического моделирования и лабораторно-полевых испытаний было выявлено увеличение плавности регулирования вертикальной скорости отвала, как следствие — уменьшение динамических нагрузок на гидропривод.

В статье [17] проводится анализ негативного влияния возникающих в процессе движения динамических нагрузок в гидроприводах лесных машин. Предложена перспективная конструктивная модернизация механизма поворота колонны манипулятора. Данное устройство позволяет значительно снизить возникающие нагрузки, тем самым увеличить эффективность гидропривода.

В работе [18] Ф. Д. Байрамов, Б. Ф. Байрамов анализируют особенности функционирования гидроприводов с использованием автоматического регулятора расхода жидкости. Автор предлагает перспективную конструкцию такого гидропривода и математическую модель динамики. На основе анализа математической модели функционирования такого устройства сделан вывод о повышении эффективности рассмотренного гидропривода.

В работе И. В. Петухова и соавт. [19] представлена программа для ЭВМ для расчёта параметров валочно-раскряжёвочной машины. Расчёт в программе производится с приме-

нением данных о давлении в агрегатах и магистралях гидропривода. Предлагается использование данной программы для оптимизации эффективности машин подобного класса.

В исследованиях [20—22] В. Д. Глебовым был разработан ряд гидроприводов для машин разного назначения. Их объединительной чертой является использование гидроаккумулятора в гидросистеме с соединёнными с рабочими полостями гидроприводов. Данное конструктивное решение было принято с целью снижения динамических нагрузок на гидропривод машин и повышения их энергоэффективности.

Проблема повышения энергоэффективности большегрузных автолесовозов активно исследуется зарубежными учёными [23—25]. Эти исследования охватывают комплексный анализ различных аспектов, начиная с кинематических особенностей движения тягача с полуприцепом и влияния аэродинамических характеристик на топливную экономичность при дальних перевозках и заканчивая изучением причин поломок седельно-сцепных устройств и разработкой методов повышения управляемости и безопасности автопоездов, включая аварийные ситуации (например, при полном отказе тормозной системы).

Анализ работ по исследованию повышения энергоэффективности гидропривода лесотранспортных машин показал малое количество исследований по рекуперации энергии применительно к бесчokerным трелёвочным агрегатам. На его основе были определены методы математического моделирования и пути достижения цели, сформулированной ранее.

На основе анализа существующих исследований, а также исходя из цели исследований, были сформулированы и решены частные задачи:

- разработка новой кинематической и гидравлической схем гидропривода трелёвочного агрегата;
- разработка расчётной схемы;
- создание математической модели работы гидропривода;
- решение математической модели на ЭВМ;
- проверка математической модели на адекватность;
- анализ результатов.

2. Материалы и методы

Объектом исследования является бесчokerный трелёвочный захват ПТН-0,8, работающий в составе агрегата с трактором МТЗ-82. Была разработана кинематическая расчётная схема (рисунок 1), которая позволит смоделировать и оптимизировать работу захвата с учётом параметров энергосберегающей гидросистемы, что, в конечном итоге, должно привести к повышению эффективности трелёвочных работ. Разработка такой схемы предполагает учёт особенностей конструкции захвата ПТН-0,8 и характеристик трактора МТЗ-82, а также принципов работы и параметров энергосберегающего гидропривода.

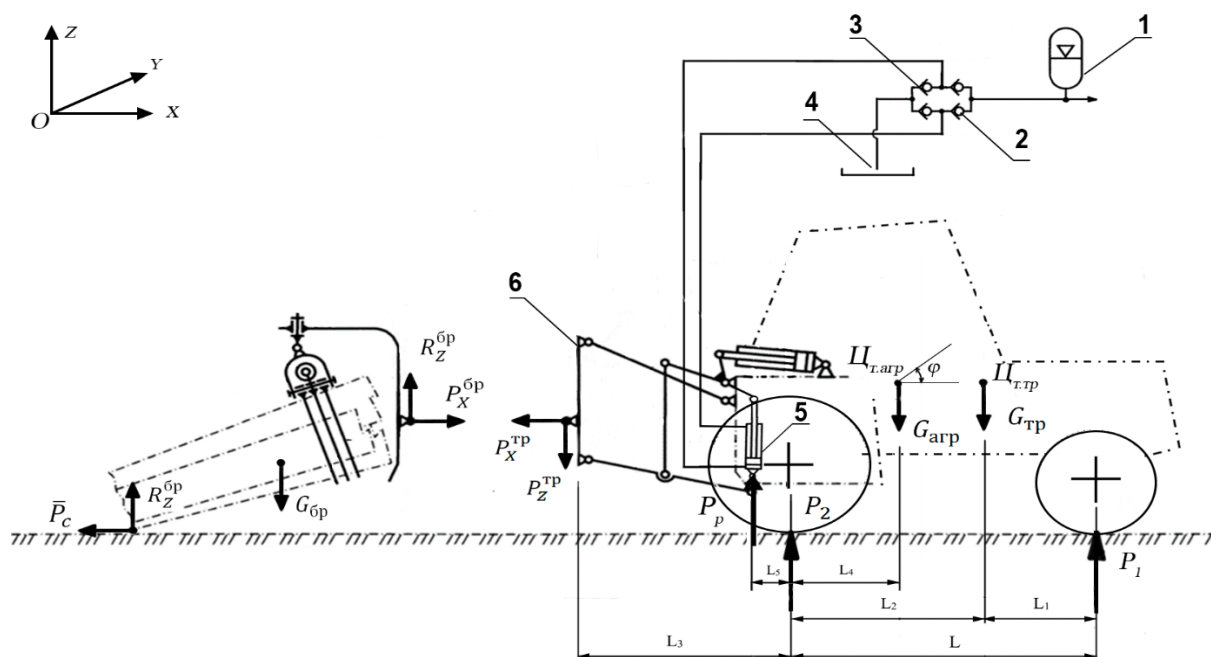


Рисунок 1. Расчётная схема бесчокерного агрегата с гидроприводом рекуперации энергии [рисунок авторов]

Figure 1. Calculation scheme of a chokerless unit with a hydraulic drive for energy recovery

Конструктивное отличие от существующей системы заключается в применении дополнительного гидроцилиндра 5, связанного с гидроаккумулятором 1, через блок клапанов 2. Соответственно физическая сущность применяемой конструкции заключается в том, что при движении агрегата по микронеровностям рельефа возникают колебания в вертикальной плоскости, которые вызывают перемещения поршня со штоком гидроцилиндра рекуперации 5, и рабочая жидкость поочередно вытесняется в гидроаккумулятор 1 через напорные обратные клапаны 2, а через всасывающие обратные клапаны 3 рабочая жидкость из гидробака 4 поступает в полости гидроцилиндра, в которых создаётся разрежение.

На основе расчётной модели разработана математическая модель рабочего процесса бесчокерного трелёвочного агрегата с гидроприводом рекуперации, которая состоит из следующих дифференциальных уравнений:

Уравнение, описывающее вертикальные колебания агрегата вдоль оси OZ:

$$m_{\text{тр}} \ddot{Z} = P_1 + P_2 - G_{\text{арп}} - P_2 + S \cdot p, \quad (1)$$

Уравнение профильных колебаний агрегата вокруг оси OY:

$$I_{\text{тр}} \ddot{\phi} = P_1 (L_1 + L_2 - L_4) - P_2 \cdot L_4 + P_2 (L_3 + L_4) - S \cdot p \cdot (L_5 + L_4) \quad (2)$$

Уравнение расходов жидкости в гидросистеме рекуперации:

$$S \frac{dz}{dt} = k \cdot \sqrt{p - p_0} + k_p \cdot \frac{dp}{dt} + a_y p, \quad (3)$$

где $m_{тр}$ — масса трелёвочного агрегата, кг; P_1 — реакция на переднем мосту, Н; P_2 — реакция на заднем мосту трактора, Н; P_z — вертикальная составляющая силы тяги, Н; S — рабочая площадь поршня гидроцилиндра рекуперации энергии, м²; p — давление жидкости в гидросистеме рекуперации, Па; $J_{трз}$ — момент инерции трелёвочного агрегата относительно центра масс агрегата, кгм²; $R_{ар}^z$ — вертикальная составляющая силы сопротивления волочению пакета брёвен на агрегате, Н; k — коэффициент дросселирования рабочей жидкости в гидролинии между гидроцилиндром рекуперации и гидроаккумулятором, м³·с·Па^{-1/2}; p_0 — давление предварительной зарядки гидроаккумулятора, Па; k_p — коэффициент податливости гибких элементов гидропривода можно определить по эмпирической зависимости, м⁵/(Н·с).

Полученная система дифференциальных уравнений является нелинейной, что исключает возможность получения точного аналитического решения. Поэтому решение может быть найдено только численными методами, например, путём определения значений искомых функций в дискретных точках на заданном интервале времени. Это позволит получить приближенное решение в виде набора точек, описывающих изменение параметров системы во времени. Для решения математической модели был использован метод Эйлера.

Допущения, принятые при составлении и решении математической модели:

- не учитывались горизонтальные колебания стрелы;
- не учитывались возможные вращения трактора вокруг оси ОХ;
- неровности рельефа представлены в виде моментального увеличения значения сил реакции.

Начальные условия для решения системы:

$$z(0) = z^0, \quad \frac{dz}{dt}(0) = z^1,$$

$$\varphi(0) = \varphi^0,$$

$$p(0) = p_0.$$

Разделим первое уравнение на $m_{тр}$, а второе — на $J_{трз}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{S}{m_{тр}} p + \frac{P_1 + P_2 - G_{ар} - P_z}{m_{тр}}; \\ \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{S(L_3 + L_4)}{J_{трз}} p + \\ + \frac{P_1(L_1 + L_2 - L_4) - P_2 L_4 + P_{ар}^z(L_3 + L_4)}{J_{трз}}; \\ \frac{dp}{dt} = -\frac{k}{k_p} \sqrt{|p - p_0|} - \frac{a_y}{k_p} p + \frac{S}{k_p} \cdot \frac{dz}{dt}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Введём следующие обозначения, необходимые для дальнейших математических преобразований:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{S}{m_{\text{тп}}}, \quad \sigma_2 = \frac{P_1 + P_2 - G_{\text{арп}} - P_z}{m_{\text{тп}}}, \\ \sigma_3 &= -\frac{S(L_3 + L_4)}{J_{\text{тп3}}}, \\ \sigma_4 &= \frac{P_1(L_1 + L_2 - L_4) - P_2 L_4 + P_{\text{арп}}^z (L_3 + L_4)}{J_{\text{тп3}}}, \\ \sigma_5 &= -\frac{k}{k_p}, \quad \sigma_6 = -\frac{a_y}{k_p}, \quad \sigma_7 = \frac{S}{k_p}.\end{aligned}$$

Тогда в предложенных обозначениях система уравнений (4) примет вид:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 z}{dt^2} &= \sigma_1 p + \sigma_2, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \sigma_3 p + \sigma_4, \\ \frac{dp}{dt} &= \sigma_5 \sqrt{|p - p_0|} + \sigma_6 p + \sigma_7 \frac{dz}{dt}.\end{aligned}\tag{5}$$

Ввиду нелинейности системы (давление входит в последнее уравнение с корнем) решение ищется приближенным методом. Отрезок $[0; t_k]$ времени t разбиваем N точками t_i с шагом h :

$$t_i = i \cdot h, \quad \text{где } h = \frac{t_k}{N}.$$

Число N в этом случае берётся как можно больше, для повышения точности результатов решения.

Функции Z, φ, p будем искать в виде последовательности точек. Обозначим:

$$Z_i = Z(t_i), \quad \varphi_i = \varphi(t_i), \quad p_i = p(t_i).$$

Тогда их производные можно аппроксимировать следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\frac{dZ}{dt}(t_i) &\approx \frac{Z_{i+1} - Z_i}{h}, \\ \frac{d\varphi}{dt}(t_i) &\approx \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h}, \quad \frac{dp}{dt}(t_i) \approx \frac{p_{i+1} - p_i}{h}, \\ \frac{d^2 Z}{dt^2}(t_i) &\approx \frac{Z_{i+2} - 2Z_{i+1} + Z_i}{h^2}, \\ \frac{d^2 \varphi}{dt^2}(t_i) &\approx \frac{\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i}{h^2}, \\ \frac{d^2 p}{dt^2}(t_i) &\approx \frac{p_{i+2} - 2p_{i+1} + p_i}{h^2}.\end{aligned}\tag{6}$$

Подставив их в систему и выделив главные члены, получим систему рекуррентных формул для нахождения искомых функций:

$$Z_{i+2} = 2Z_{i+1} - Z_i + \sigma_1 h^2 \cdot p_i + \sigma_2 h^2,\tag{7}$$

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \sigma_2 h \cdot p_i + \sigma_4 h, \quad (8)$$

$$p_{i+1} = (1 + \sigma_6 h) \cdot p_i + \sigma_5 h \sqrt{|p_i - p_0|} + \sigma_7 \cdot (Z_{i+1} - Z_i), \quad (9)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots$.

Начальные значения для них:

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z^0, \quad Z_1 = Z^0 + hZ^1, \\ \varphi_0 &= \varphi^0, \\ p_0 &= p_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Решить данную математическую модель можно путём построения циклического алгоритма в программном продукте Excel. Данная программа позволит построить зависимости функций 7, 8, 9 на основании проведённых расчётов.

Условием проведения расчётов является плотность пней на вырубке 200 шт./км, возможно возникновение 60 столкновений трелюемой пачки сортиментов при среднем расстоянии трелёвки 300 м, массе трелюемой пачки 600 кг и амплитуде колебаний агрегата 0,2 м.

Важно отметить, что при расчёте значение h должно стремиться к нулю для повышения точности расчёта. Исходными данными для расчёта принимаются геометрические и гидродинамические параметры трактора МТЗ-82 и ПНТ «Муравей».

Расчётные графики зависимостей имеют следующий вид (рисунки 2 и 3).

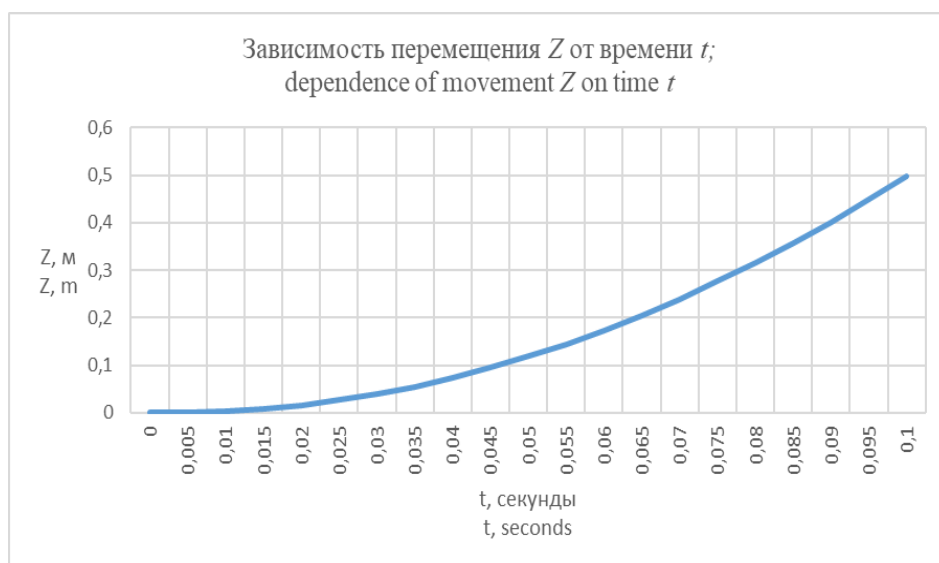


Рисунок 2. График функции $Z_i = Z(t_i)$. [рисунок авторов]

Figure 2. Function plot $Z_i = Z(t_i)$.

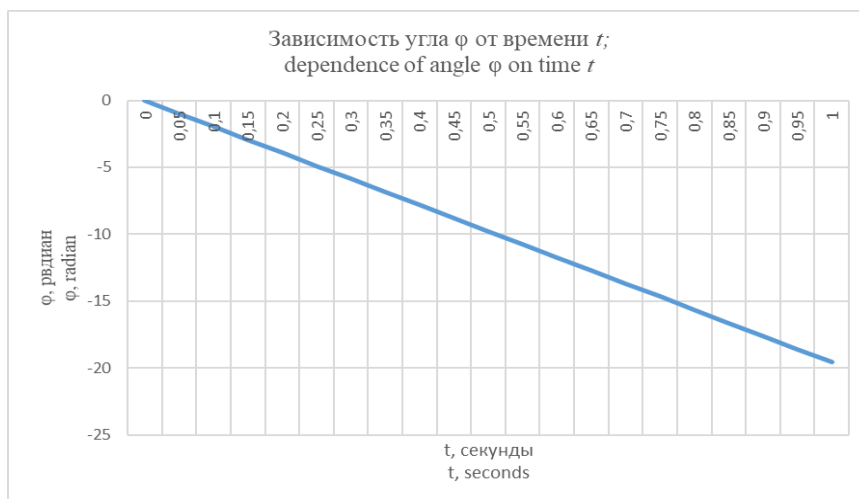


Рисунок 3. График функции $\varphi_i = \varphi(t_i)$. [рисунок авторов]

Figure 3. Function plot $\varphi_i = \varphi(t_i)$.

Для проверки адекватности математической модели рабочих процессов энергосберегающего гидропривода трелёвочного захвата для агрегатирования с трактором МТЗ-82 проведены предварительные лабораторные испытания. Лабораторная установка (фото 2) включает следующие элементы: 1 — захват, 2 — навес, 3 — верхняя тяга, 4 — рама, 5 — болтовое соединение рам, 6 — рама для навески на трактор, 7 — гидрораспределитель, 8 — масляный бак, 9 — рукав высокого давления, 10 — гидроаккумулятор, 11 — гидроцилиндр захвата, 12 — имитация груза.

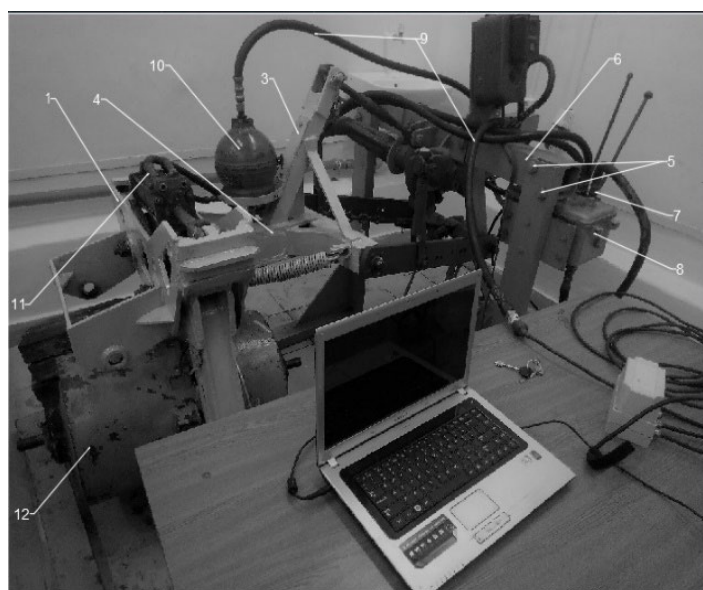


Фото 2. Лабораторная установка [рисунок авторов]

Photo 2. Laboratory setup

На основе экспериментов были получены зависимости давления в гидросистеме рекуперации от времени. Среднее значение давления составило 5,0013 МПа, что говорит об адекватности модели (рисунок 4).

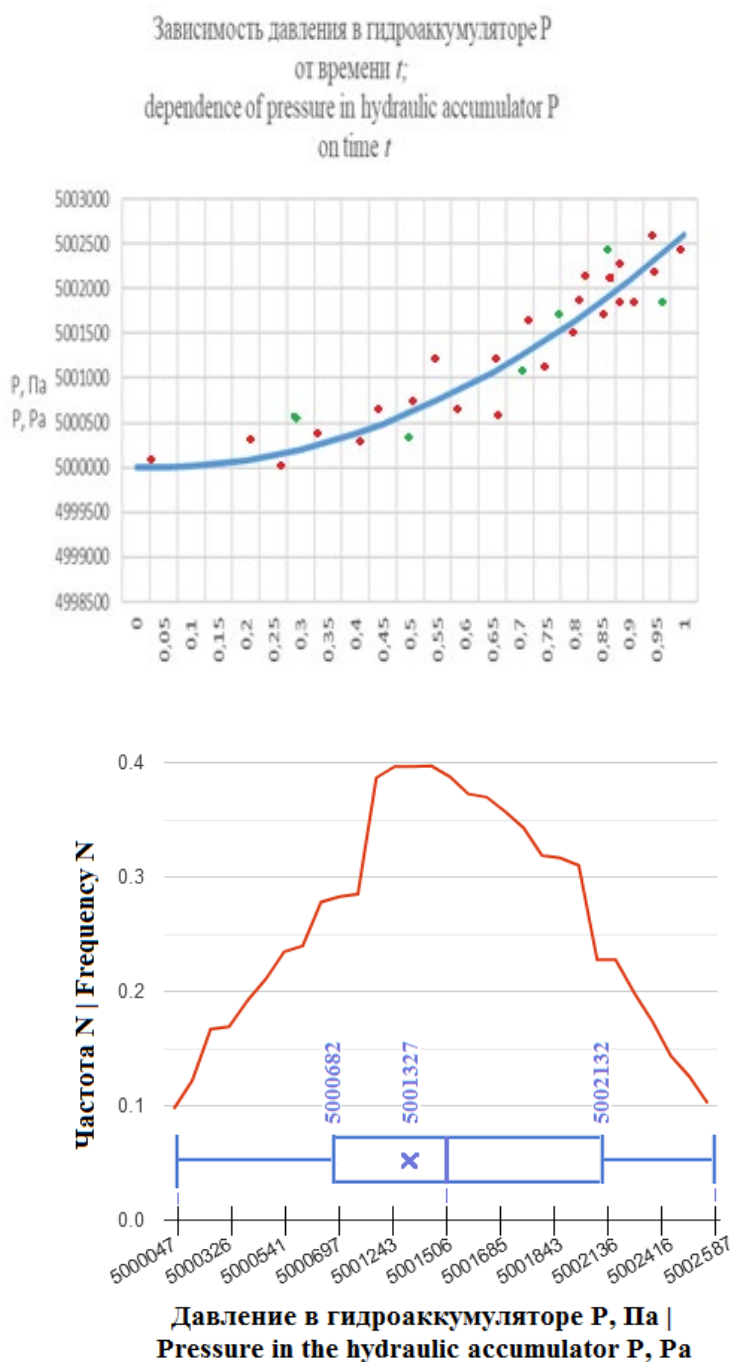


Рисунок 4. Зависимости давления в гидроприводе рекуперации от времени и статистические характеристики [рисунок авторов]

Figure 4. Time-dependent pressure in the hydraulic recovery drive and statistical characteristics

3. Результаты

При проведении расчётов с математической моделью было установлено, что давление в системе при возникновении колебаний превышает давление гидроаккумулятора, что способствует его зарядке.

В результате реализации предложенных решений по совершенствованию конструкции приспособления трелёвочного навесного ПТН-0,8 в агрегате с трактором МТЗ-82 наблюдается снижение динамических нагрузок, увеличение усилия зажима сортиментов в захвате. Это должно привести к уменьшению или полному исключению случаев выскакивания некоторых сортиментов из пачки в процессе трелёвки, а значит, к увеличению объёма трелюемой пачки и уменьшению количества циклов работы трелёвочной техники на лесосеке. В конечном итоге должна повыситься производительность работы с одновременным уменьшением затрат на процесс трелёвки.

Для сравнительного экономического анализа новой конструкции бесчокерного агрегата с аналогом можно использовать следующее выражение:

$$C_1 = \frac{C_{msm} M_j k_{изр} \sum_{i=1}^I t_i}{3600 V_p m \varphi} = \frac{C_{msm} k_{изр} M_j (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8)}{3600 V_p m \varphi} = \frac{C_{msm} k_{изр} M_j \left(\frac{l}{v_1} + t_2 + t_3 + \frac{l}{v_2} + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 \right)}{3600 V_p m \varphi}, \quad (11)$$

где C_{msm} — себестоимость машино-смены агрегата МТЗ-82 + ПТН-0,8, руб.; M_j — объём вырубленной древесины, j -й приём рубки на разрабатываемой лесосеке, м³; $k_{изр}$ — доля вырубленного компонента леса; m — продолжительность смены, ч; φ — коэффициент использования времени смены; V_p — объём трелюемой пачки, м³; T_i — продолжительность i -й составляющей времени цикла трелёвки древесины, с; I — число составляющих времени цикла трелёвки; t_1 — время холостого хода трелёвочного средства с верхнего склада на пачку к месту захвата сортиментов, с; t_2 — время опускания челюстного захвата на пачку сортиментов, с; t_3 — время на захват пачки сортиментов, с; t_4 — время на перевод трелёвочного приспособления в транспортное положение после захвата пачки сортиментов, с; t_5 — время манёвров трелёвочного средства на пачке, с; t_6 — время рабочего хода трелёвочного средства с пачки на погрузочный пункт, с; t_7 — время на разгрузку пачки, с; t_8 — время манёвров трелёвочного средства на верхнем складе, с; l — среднее расстояние трелёвки, м; v_1 — скорость движения трелёвочного средства в порожнем состоянии, м; v_2 — скорость движения трелёвочного средства в рабочем состоянии, м.

На основе выражения (11) можно выполнять оценку экономической эффективности применения трелёвочного агрегата на рубках ухода с учётом конкретных природно-производственных условий каждой новой разрабатываемой лесосеки.

Нами был выполнен сравнительный анализ работы трелёвочного агрегата по производительности до и после изменения его конструкции. Для этого потребовались данные в реальных условиях работы (ТОГАУ «Моршанский лесхоз», Тамбовская область, июль 2025 г.): размеры заготавливаемых сортиментов, объём пачки, доля выпадающих из пачки

сортиментов, а также продолжительность составляющих времени цикла. Наблюдения показали, что объём выпадаемой из захвата древесины за час работы трелёвочного агрегата МТЗ-82 + ПТН-0,8 составил $0,933 \text{ м}^3$. В результате реализации предложенных решений по совершенствованию его конструкции наблюдается рост часовой (с $3,47$ до $4,2 \text{ м}^3$) и сменной производительности (с $22,27$ до $26,9 \text{ м}^3$) при расстоянии трелёвки 270 м на уровне 17% (рисунок 5).

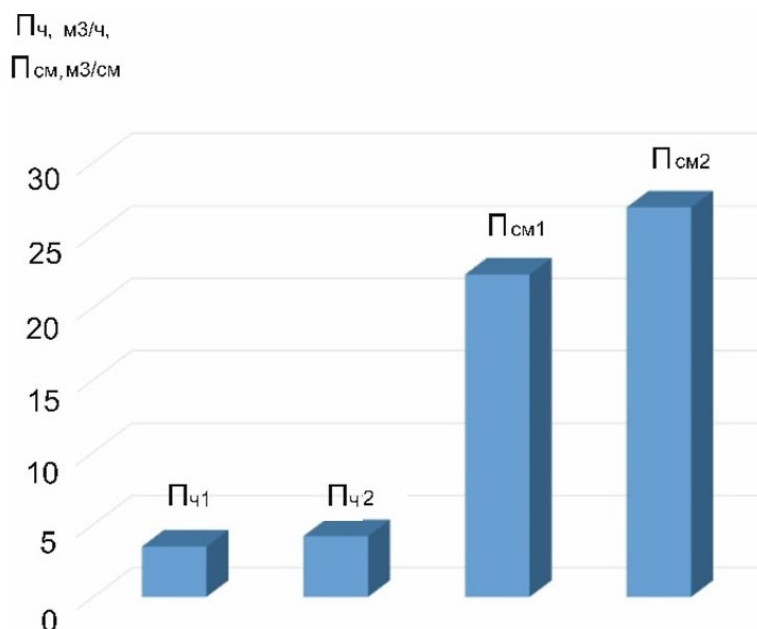


Рисунок 5. Рост часовой и сменной производительности после изменения конструкции трелёвочного агрегата МТЗ-82 + ПТН-0,8. *Источник:* собственные вычисления авторов [рисунок авторов]

Figure 5. Increase in hourly and shift productivity after changing the design of the MTZ-82 + PTN skidding unit-0.8. *Source:* authors' own calculations

Кроме этого, при плотности пней на вырубке 200 шт./км количество наездов трелюемой пачки сортиментов при среднем расстоянии трелёвки 300 м может составить около 60 столкновений, а следовательно, энергосбережение при массе трелюемой пачки 600 кг и амплитуде колебаний агрегата $0,2 \text{ м}$ может составить 48 кДж за один цикл трелёвки, т. е. произойдёт снижение энергозатрат на 10% . При возвращении этой энергии в гидросистему обеспечивается поджатие сортиментов в захвате и предупреждается потеря сортиментов из трелюемой пачки и самопроизвольное опускание навесной системы трактора вследствие утечек рабочей жидкости. Таким образом, при применении гидропривода рекуперации в трелёвочном агрегате сокращаются энергетические и другие затраты на трелёвку древесины, увеличивается производительность агрегата и снижается техногенное воздействие на лесную среду.

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведён анализ существующих исследований по применению систем рекуперации энергии в машинах лесной промышленности. Предложена перспективная кинематическая схема трелёвочного агрегата с системой рекуперации энергии вертикальных колебаний.

2. Разработана математическая модель движения трактора с агрегатом по лесосеке. Проведена проверка адекватности модели при помощи лабораторного стенда, результаты которой подтвердили теоретические исследования. Решение модели показало, что энергоэффективность может составить 48 кДж за один цикл трелёвки, т. е. произойдёт снижение энергозатрат на 10 %.

3. Применение разработанной схемы позволит сократить энергетические затраты на трелёвку древесины, повысить производительность агрегата и снизить техногенное воздействие на лесную среду.

4. При плотности пней на вырубке 200 шт./км возможно возникновение 60 столкновений трелюемой пачки сортиментов при среднем расстоянии трелёвки 300 м, а следовательно, энергосбережение при массе трелюемой пачки 600 кг и амплитуде колебаний агрегата 0,2 м может составить 48 кДж за один цикл трелёвки, т. е. произойдёт снижение энергозатрат на 10 %.

5. Сравнительный анализ работы трелёвочного агрегата по производительности до и после изменения его конструкции показал, что объём выпадаемой из захвата древесины за час работы МТЗ-82 + ПТН-0,8 составляет 0,933 м³. В результате реализации предложенных решений по совершенствованию его конструкции наблюдается рост часовой (с 3,47 до 4,2 м³) и сменной производительности (с 22,27 до 26,9 м³) при расстоянии трелёвки 270 м на уровне 17 %. Кроме этого, уменьшение объёма выпадаемой древесины снижает количество рейсов трелёвочного средства (1—2 рейса), а значит, приводит к уменьшению транспортной работы, энергозатрат и негативных последствий техногенного воздействия на окружающую среду.

Благодарности

Авторы выражают признательность старшему преподавателю кафедры высшей математики, кандидату физико-математических наук Владимиру Игоревичу Ускову за оказанную помощь в подготовке материалов для статьи, а также рецензентам.

Список литературы

1. *Абрамов В. В.* Разработка и обоснование эффективной технологии трелёвки в малолесных районах: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.21.01. Воронеж, 2009. 366 с.
2. *Бондаренко А. В., Абрамов В. В., Пошарников Ф. В.* Моделирование природно-производственных условий в задачах исследования первичного транспорта леса в горной местности // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2 (40). URL: www.science-education.ru/102-5518. Текст: электронный.

3. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках / Л. Д. Бухтояров, В. В. Абрамов, А. А. Просужих [и др.] // *Resources and Technology*. 2020. Т. 17, № 3. С. 1—35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258123>. Текст: электронный.
4. Юдин Р. В., Максименков А. И., Аксенов А. А. Моделирование процессов в системе гидравлического привода лесозаготовительных машин // *Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития*. Воронеж: ВГЛУ, 2022. С. 81—85. DOI: 10.58168-/MFCCPTD2022_81-85.
5. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. Ю. Мануковский [и др.] // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2022. № 5. С. 85—99. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-85-99.
6. Ворожцов О. В. Гидропривод рекуперации энергии транспортного средства // *Математическое моделирование систем и процессов*. Псков: ПГУ, 2022. С. 57—62. DOI: 10.37490/-978-5-00200-102-6-57-62.
7. Моделирование работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учётом объёмной жесткости энергосберегающего гидропривода / А. Т. Рыбак, П. И. Попиков, Д. Ю. Дручинин [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2024. № 2 (54). С. 280—294. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16.
8. Соколов А. П. Имитационное моделирование процессов заготовки древесины // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023. № 245. С. 244—260. DOI: 10.212-66/2079-4304.2023.245.244-260.
9. Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders, modeling and Calculation / A. Pelipenko, A. Rybak, D. Sarkisian D. [et al.] // *Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*. 2022. No. 1 (246). P. 198—206. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_22.
10. Кинематический и динамический анализ механизма подъёма манипулятора сортиментовоза, оснащённого гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты / Д. С. Богданов, А. В. Попикова, И. Д. Евсиков [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2024. № 2 (54). С. 127—143. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8.
11. Голякевич С. А., Мохов С. П., Гороновский А. Р. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн*. Минск: БГТУ, 2024. С. 6—8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65593620>. Текст: электронный.
12. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Аналитическое моделирование технологических процессов заготовки древесины комплексами машин «харвестер — форвардер» // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн*. Минск: БГТУ, 2024. С. 9—13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65593621>. Текст: электронный.
13. Голякевич С. А., Карсюк Р. А., Лой В. Н. Математическая модель динамики манипуляторов комбинированного типа для многооперационных лесозаготовительных машин // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн*. Минск: БГТУ, 2024. С. 14—18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65593622>. Текст: электронный.
14. Применение законов механики при моделировании лесных гидроманипуляторов / И. Д. Евсиков, П. И. Попиков, Н. Ю. Евсикова [и др.] // *Физические основы современных наукоёмких технологий*. Воронеж: ВГЛУ, 2022. С. 68—73. DOI: 10.34220/PFMSIT-2022_68-73.
15. Влияние режимов движения лесовозного автопоезда при вывозке лесоматериалов на эффективность рекуперации энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве / В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. О. Никонов [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2022. № 4 (48). С. 114—129. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8.

16. Сакович Н. Е., Шилин А. С. Повышение эффективности и надёжности гидроприводов сельскохозяйственных машин // Конструирование, использование и надёжность машин сельскохозяйственного назначения. 2023. № 1 (22). С. 80—88. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54125509>. Текст: электронный.
17. О перспективности использования гидроцилиндров в поворотном механизме колонны гидравлического манипулятора лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. А. Михайлов [и др.] // Инновации в автомобильном транспорте. Воронеж: ВГЛУ, 2022. С. 4—9. DOI: 10.34220/IRT2022_4-9.
18. Байрамов Ф. Д., Байрамов Б. Ф. Гидросистема и гидроприводы с автоматическим регулятором расхода жидкости и исследование их функционирования // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 2. С. 51—58. DOI: 10.52261/02346206_-2022_2_51.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668793. Российская Федерация. Программа для расчёта параметров работы технологического оборудования лесозаготовительных машин / Петухов И. В., Танрывердиев И. О., Стешина Л. А. [и др.]: заявка № 2023667404: заявл. 18.08.2023: опубл. 04.09.2023. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54650612>. Текст: электронный.
20. Патент № 2775631 С1. Российская Федерация. Гидропривод рабочего оборудования строительной машины / Глебов В. Д.: заявка № 2021120150: заявл. 08.07.2021: опубл. 05.07.2022. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49200549>. Текст: электронный.
21. Патент № 2806779 С2. Российская Федерация. Гидропривод стрелового рабочего оборудования землеройной машины / Глебов В. Д.: заявка № 2022112471: заявл. 07.05.2022: опубл. 07.11.2023. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=56008351>. Текст: электронный.
22. Патент № 2795877 С1. Российская Федерация. Гидропривод землеройной машины / Глебов В. Д.: заявка № 2022115693: заявл. 09.06.2022: опубл. 12.05.2023. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53822399>. Текст: электронный.
23. Linear reversing control of semi-trailer trains based on hitch angle stable and feasible domain / X. Guang, Z. Mingzhuo, T. Xiwen [et al.] // Control Engineering Practice. 2020. No. 104. P. 104625. DOI: 10.1016/j.conengprac.104625.
24. Effects of semi-trailer modifications on HGV fuel consumption / K. M. Anil, A. Daniel, N. Xiaoxiang [et al.] // Transportation Research. 2021. No. D92. P. 102717. DOI: 10.1016/j.trd.2021.-102717.
25. Qing Z., Shuo W., Youming C. Failure analysis of the fifth wheel couplings utilized in heavy semi-trailer tractors // Engineering Failure Analysis. 2020. No. 109. P. 104352. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104352.

References

1. Abramov V. V. *Development and justification of efficient technology for skidding in low forest areas*: Cand. of technical sci. Diss. Voronezh, 2009. 366 p. (In Russ.)
2. Bondarenko A. V., Abramov V. V., Posharnikov F. V. Modeling of natural and industrial conditions in the tasks of research of primary forest transport in mountainous areas. *Modern Problems of Science and education*, 2012, no. 2 (40). Available at: www.science-education.ru/102-5518. Text. Image: electronic.
3. Bukhtoyarov L. D., Abramov V. V., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigoriev I. V. Analysis of designs and operating technologies of forwarders in logging operations //

- Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. (3), pp. 1—35. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258123>. Text. Image: electronic.
4. Yudin R. V., Maksimenkov A. I., Aksenov A. A. Modeling of processes in the hydraulic drive system of logging machines. *Modern forest complex of the country: problems and development trends*. Voronezh, VGLTU, 2022, pp. 81—85. doi: 10.58168/MFCCPTD2022_81-85. (In Russ.)
 5. Posmetyev V. I., Nikonov V. O., Manukovsky A. Yu. [et al.]. Computer modeling of the operation of a recuperative rotary conical device of a timber tractor with a trailer. *Izvestia of universities. Forest journal*, 2022, no. 5, pp. 85—99. doi: 10.37482/0536-1036-2022-5-85-99. (In Russ.)
 6. Vorozhtsov O. V. Hydraulic drive for energy recovery of a vehicle. *Mathematical modeling of systems and processes*. Pskov, PSU, 2022, pp. 57—62. doi: 10.37490/978-5-00200-102-6-57-62. (In Russ.)
 7. Rybak A. T., Popikov P. I., Druchinin D. Yu. [et al.]. Modeling the operation of the rotation mechanism of the column of the timber truck manipulator taking into account the volumetric rigidity of the energy-saving hydraulic drive. *Forestry Engineering journal*, 2024, no. 2 (54), pp. 280—294. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16. (In Russ.)
 8. Sokolov A. P. Simulation modeling of timber harvesting processes. *Bulletin of the Saint Petersburg Forest Engineering Academy*, 2023, no. 245, pp. 244—260. doi: 10.21266/2079-4304.-2023.245.244-260. (In Russ.)
 9. Pelipenko A., Rybak A., Sarkisian D. [et al.]. Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders, modeling and Calculation. *Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*, 2022, no. 1 (246), pp. 198—206. doi: 10.1007/978-3-030-81619-3_22.
 10. Bogdanov D. S., Popikova A. V., Evsikov I. D. [et al.]. Kinematic and dynamic analysis of the lifting mechanism of a timber truck manipulator equipped with a hydromechanical damper based on the Euler and Runge-Kutta methods. *Forestry Engineering journal*, 2024, no. 2 (54), pp. 127—143. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8. (In Russ.)
 11. Golyakevich S. A., Mokhov S. P., Goronovsky A. R. Methodology for predicting the efficiency of logging machine complexes. *Forest engineering, materials science and design*. Minsk, BSTU, 2024, pp. 6—8. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65593620>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
 12. Golyakevich S. A., Goronovsky A. R. Analytical modeling of technological processes of timber harvesting by complexes of machines «harvester — forwarder». *Forest engineering, materials science and design*. Minsk, BSTU, 2024, pp. 9—13. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65593621>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
 13. Golyakevich S. A., Karsyuk R. A., Loy V. N. Mathematical model of the dynamics of combined-type manipulators for multi-operational logging machines. *Forest engineering, materials science and design*. Minsk, BSTU, 2024, pp. 14—18. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65593622>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
 14. Evsikov I. D., Popikov P. I., Evsikova N. Yu. [et al.]. Application of the laws of mechanics in modeling forest hydraulic manipulators. *Physical foundations of modern science-intensive technologies*. Voronezh, VGTU, 2022, pp. 68—73. doi: 10.34220/PFMSIT2022_68-73. (In Russ.)
 15. Posmetyev V. I., Zelikov V. A., Nikonov V. O. [et al.]. The influence of the driving modes of a timber road train during the transportation of timber on the efficiency of energy recovery in a pneumohydraulic fifth wheel coupling. *Forestry Engineering journal*, 2022, no. 4 (48), pp. 114—129. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8. (In Russ.)
 16. Sakovich N. E., Shilin A. S. Improving the efficiency and reliability of hydraulic drives of agricultural machines. *Design, use and reliability of agricultural machinery*, 2023, no. 1 (22), pp. 80—88. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54125509>. Text. Image: electronic.

17. Posmetyev V. I., Nikonov V. O., Mikhailov A. A. [et al.]. On the prospects of using hydraulic cylinders in the rotary mechanism of the column of the hydraulic manipulator of a timber road train. *Innovations in automobile transport*. Voronezh, VGTU, 2022, pp. 4—9. doi: 10.34220-/IRT2022_4-9. (In Russ.)
18. Bayramov F. D., Bayramov B. F. Hydraulic system and hydraulic drives with automatic fluid flow regulator and study of their functioning. *Problems of mechanical engineering and automation*, 2022, no. 2, pp. 51—58. doi: 10.52261/02346206_2022_2_51. (In Russ.)
19. Petukhov I. V., Tanryverdiev I. O., Steshina L. A. [et al.]. Certificate of state registration of computer program no. 2023668793. Russian Federation. Program for calculating the operating parameters of technological equipment of logging machines. Application no. 2023667404: declared. 08/18/2023: published. 09/04/2023. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=-54650612>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
20. Glebov V. D. Patent no. 2775631 C1. Russian Federation. Hydraulic drive of working equipment of a construction machine. Application no. 2021120150: declared. 07/08/2021: published. 07/05/2022. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49200549>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
21. Glebov V. D. Patent no. 2806779 C2. Russian Federation. Hydraulic drive of boom working equipment of an earthmoving machine. Application no. 2022112471: declared 05/07/2022: published 11/07/2023. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=56008351>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
22. Glebov V. D. Patent no. 2795877 C1. Russian Federation. Hydraulic drive of an earthmoving machine. Application no. 2022115693: declared. 06/09/2022: published. 05/12/2023. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53822399>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
23. Guang X., Mingzhuo Z., Xiwen T. [et al.]. Linear reversing control of semi-trailer trains based on hitch angle stable and feasible domain. *Control Engineering Practice*, 2020, no. 104, p. 104625. doi: 10.1016/j.conengprac.104625.
24. Anil K. M., Daniel A., Xiaoxiang N. [et al.]. Effects of semi-trailer modifications on HGV fuel consumption. *Transportation Research*, 2021, no. D92, p. 102717. doi: 10.1016/j.trd.2021.-102717.
25. Qing Z., Shuo W., Youming C. Failure analysis of the fifth wheel couplings utilized in heavy semi-trailer tractors. *Engineering Failure Analysis*, 2020, no. 109, p. 104352. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104352.

© Дерепаско И. В., Попиков П. И., Полукаров Д. А., Черных А. С.,
Мануковский А. Ю., Абрамов В. В., Савченко С. И., 2025