

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12>

УДК 630.3:621.22:681.3



## Моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора манипулятора лесных машин

Михаил В. Драпалюк, [michael1@yandex.ru](mailto:michael1@yandex.ru), 0000-0002-8029-2706

Алексей А. Платонов, [paa7@rambler.ru](mailto:paa7@rambler.ru) 0000-0003-4114-4636

Петр И. Попиков, [porikovpetr@yandex.ru](mailto:porikovpetr@yandex.ru) 0000-0002-6348-8934

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

### Аннотация

В работе проводится исследование и моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора, используемого в манипуляторах лесохозяйственных машин. Манипуляторные установки этих машин играют ключевую роль в выполнении технологических операций при подготовке площадей для выращивания лесных культур, а также при их последующем уходе. Для повышения эффективности выполняемых операций, таких как срезание или удаление нежелательной древесно-кустарниковой растительности, удаление камней, валунов и других препятствий, актуальным направлением является модернизация манипуляторов. Одним из перспективных способов снижения энергоемкости рабочего процесса является внедрение высокоэффективных вибрационных воздействий, прикладываемых к рабочим органам манипулятора. Анализ современных исследований в области гидравлических пульсаторов показал, что разработка новых конструкций роторных пульсаторов может существенно улучшить показатели эффективности. В ходе работы установлено, что эксплуатационные параметры гидравлического пульсатора, такие как диаметр золотникового вала и площадь отверстия для перетекания рабочей жидкости, зависят от максимального угла поворота оси золотникового вала, равного  $22^{\circ}30'$ . Определены допустимые зоны вариации геометрических параметров указанного отверстия. Исследования показали, что изменение площади отверстия для перетекания жидкости во времени оказывает непосредственное влияние на расход рабочей жидкости через штоковую или поршневую полости гидроцилиндра. Наибольшее время перетекания жидкости (1–1,6 с) наблюдается при частотах вращения золотникового вала 10–20 об/мин. Установлено, что для отверстий диаметром 5 мм в зоне малых частот вращения время отсутствия перетока жидкости возрастает на 0,18–0,36 с. Для гидравлических рукавов высокого давления с внутренними диаметрами 8–16 мм, наиболее часто применяемых в лесохозяйственной технике, максимальный расход рабочей жидкости составляет 0,00101 м<sup>3</sup>/с (1,01 л/с). Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования конструкций гидравлических пульсаторов и повышения эффективности манипуляторов лесных машин.

**Ключевые слова:** *манипулятор, гидравлический пульсатор, золотниковый вал, гидроцилиндр, частота вращения, рабочая жидкость, расход.*

**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:** Драпалюк, М. В. Моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора манипулятора лесных машин / М. В. Драпалюк, А. А. Платонов, П. И. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 191–206. – Библиогр.: с. 204–206 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12>.

*Поступила 03.12.2024. Пересмотрена 26.05.2025. Принята 05.06.2025. Опубликовано онлайн 26.06.2025.*

## Modelling of the working process of the hydraulic pulsator of forest machine manipulator

**Mikhail V. Drapalyuk**, michael1@yandex.ru,  0000-0002-8029-2706

**Alexey A. Platonov**,  paa7@rambler.ru  0000-0003-4114-4636

**Petr I. Popikov**, popikovpetr@yandex.ru  0000-0002-6348-8934

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

### Abstract

The article studies and simulates of the working process of the hydraulic pulsator used in the manipulators of forestry machines. Manipulator units of these machines play a key role in the performance of technological operations in the preparation of areas for growing forest crops, as well as in their subsequent maintenance. To increase the efficiency of operations such as cutting or removing unwanted tree and shrub vegetation, removing stones, boulders and other obstacles, the modernization of manipulators is an actual direction. One of the promising ways to reduce the energy intensity of the working process is the introduction of highly effective vibration effects applied to the working bodies of the manipulator. The analysis of modern research in the field of hydraulic pulsators has shown that the development of new designs of rotary pulsators can significantly improve the performance indicators. In the course of the work, it has been revealed that the operating parameters of the hydraulic pulsator, such as the diameter of the spool shaft and the area of the working fluid overflow hole, depend on the maximum angle of rotation of the spool shaft axis equal to  $22^{\circ}30'$ . The permissible zones of variation of geometrical parameters of the specified orifice are determined. Researches have shown, that change of area of an aperture for a fluid flow in time has a direct influence on the working fluid flow rate through the rod or piston cavity of the hydraulic cylinder. The greatest time of liquid overflow (1-1.6 s) is observed at rotational speeds of the spool shaft 10-20 rpm. It is established that for holes with diameter of 5 mm in the zone of small rotational speeds the time of absence of liquid overflow increases by 0.18-0.36 s. For high-pressure hydraulic hoses with internal diameters of 8-16 mm, most often used in forestry machinery, the maximum flow rate of working fluid is 0.00101 m<sup>3</sup>/s (1.01 l/s). The results are of practical importance for improving the designs of hydraulic pulsators and increasing the efficiency of forest machine manipulators.

**Keywords:** *manipulator, hydraulic pulsator, spool shaft, hydraulic cylinder, rotation frequency, working fluid, flow rate*

**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:** Drapalyuk M. V., Platonov A. A., Popikov P. I. (2025). Modeling of the working process of a hydraulic pulsator manipulator of forest machines. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 191-206 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12>.

*Received* 03.12.2024. *Revised* 26.05.2025. *Accepted* 05.06. 2025. *Published online* 26.06.2025.

### **Введение**

В процессе выполнения работ по подготовке к выращиванию лесных культур, а также их дальнейшему уходу, значительную роль играет применение лесохозяйственной техники, оснащённой манипуляторными установками (Zanchi G., et al., 2021). Такие установки позволяют эффективно выполнять широкий спектр задач, включая расчистку территорий от нежелательной древесной, кустарниковой и травянистой растительности с использованием кусторезов, мульчеров и корчевальных головок, а также удаление остатков растительности, таких как пни, с помощью фрез или корчевателей. Кроме того, манипуляторы с активными рабочими органами применяются для обработки корневых систем и удаления посторонних объектов, таких как камни и валуны.

Развитие и модернизация манипуляторов, которые классифицируются по степени подвижности, конструктивным особенностям, типу управления, назначению и специализации, способствует улучшению технологических операций, связанных с лесохозяйственной деятельностью. Современные требования к качеству выполнения таких операций требуют внедрения инновационных инженерных решений, включая проектирование новых механических конструкций манипуляторов и их интеграцию с гидравлическими, пневматическими и электрическими элементами. Эти разработки позволяют добиваться эффективного использования манипуляторных систем в реальных производственных условиях.

Особое внимание в современной отечественной и мировой технической литературе уделяется разработке высокоэффективных вибрационных воздействий, которые прикладываются к рабочему органу, размещённому на конце стрелы или рукояти манипулятора, либо к самой стреле или рукояти. Вибрационные воздействия позволяют снизить нагрузку на элементы манипуляторной системы в процессе выполнения технологических операций и одновременно увеличить эффективность и качество выполняемых работ.

Создание таких вибрационных воздействий возможно, в частности, за счёт использования гидравлических пульсаторов в гидрокинематической схеме манипулятора. Эти устройства обеспечивают

периодическую генерацию импульсов давления на штоке гидроцилиндра манипуляторной системы. Например, в работе M. Krüger (2025) был представлен грейферный захват с гидравлическим вибрационным приводом, который в процессе работы совершает вынужденные колебания. Авторы предложили математические зависимости для анализа колебаний рабочего органа, подвешенного на тросе, и динамического отклика гидравлического привода.

Современные исследования также направлены на совершенствование конструкций манипуляторов, в том числе их гидроприводов. В частности, работа В.И. Посметьева и соавторов (2024) посвящена анализу механизмов рекуперации энергии при повороте колонны гидроманипулятора лесных машин с оптимизацией геометрических параметров кривошипно-поворотного механизма. С.Е. Анисимов и соавторы (2024) разработали и исследовали конструкцию многозвенного комбинированного манипулятора с гидравлическим приводом, обеспечивающим выдвигание рабочего органа на расстояние до 18 м. В свою очередь, G. Yang и соавторы (2020) предложили метод управления манипулятором, позволяющий достигать высокой точности управления в условиях неопределённости динамики и изменчивости состояния системы.

Методы оптимизации работы манипуляторов также направлены на улучшение их траектории. Так, в работе I. Saoud и соавторов (2024) использован модифицированный профиль синусоидального рывка, минимизирующий время выполнения траектории манипулятора и обеспечивающий плавность его движения.

Настоящая работа направлена на моделирование и изучение рабочего процесса гидравлического пульсатора, используемого в манипуляторных системах лесных машин. Такое исследование имеет целью улучшение эксплуатационных характеристик манипуляторов и качества выполняемых лесохозяйственных операций за счёт внедрения инновационных технических решений.

Современные исследования, направленные на совершенствование рабочих процессов манипуляторов лесных машин, уделяют особое внимание моделированию их динамических характеристик,

исследованию гидроприводов и развитию конструкций, обеспечивающих повышение эффективности операций.

Так, в работе И.Д. Евсикова и др. (2023) была представлена математическая модель поворота стрелы манипулятора лесной машины с учетом расхода рабочей жидкости, включая анализ динамики системы гидропривода и давления в гидравлической магистрали при реализации рабочего процесса. Особое внимание уделено влиянию этих параметров на общее поведение манипулятора.

Коллективом авторов под руководством проф. О.Р. Дорняка (2024) предложена математическая модель, позволяющая исследовать динамическое нагружение элементов гидросистемы манипулятора. В центре их работы находились пульсации давления, вызывающие высокочастотные колебания элементов гидроагрегатов с большой амплитудой, что оказывает влияние на эксплуатационную надежность механизмов.

Метод управления движением гидравлических манипуляторов был предложен R. Ding и соавторами (2023). Их высокоточный алгоритм основан на принципах управления виртуальной декомпозицией. Полученные результаты демонстрируют минимальную погрешность в позиционировании манипулятора (менее 50 мм), что подчеркивает перспективность применения подобного метода для повышения точности управления.

Методологические подходы к моделированию динамических характеристик манипуляторов были также рассмотрены в исследованиях Z. Liu и др. (2022) 12 и P. Rao и др. (2023). Проведенные ими расчёты на основе метода конечных элементов подтверждают возможность переноса полученных результатов на другие модели манипуляторов, а также интеграции данных исследований в виртуальной среде для упрощения сложных вычислений.

Работа P. Pietruś и P. Gierlak (2023) направлена на анализ частотных характеристик манипуляторов. С помощью численного моделирования был определён спектр вибраций звеньев манипулятора, проведены испытания различных конфигураций, что позволило сформировать карту резонансных частот для оптимизации конструктивных параметров.

Особое внимание уделяется совершенствованию конструкций гидравлических пульсаторов, являющихся ключевыми элементами системы создания импульсов давления. Так, в исследовании N. Tuong и соавторов (2024) с использованием программного обеспечения Matlab Simulink и инструмента Simscape Hydraulic была создана гидравлическая схема пульсатора, которая позволила выполнить проверку расчетных характеристик системы. Расчёты рамы манипулятора выполнялись методом конечных элементов с использованием Altair Simlab, что позволило определить наиболее оптимальные конструктивные решения.

Методика проектного расчета конструкции гидроимпульсного пульсатора была предложена R. Obertyukh и др. (2024). Разработанная модель с клапанным генератором импульсов давления параметрического типа позволила определить энергетические и мощностные характеристики пульсатора. Однако исследователи отмечают отсутствие общепринятой методики проектирования гидроимпульсных пульсаторов, что подтверждает необходимость проведения дальнейших оригинальных исследований в данной области.

Также в работе L. Zaripova и соавторов (2024) был исследован вибрационный пульсатор с гидромеханическим принципом действия, в конструкции которого применён подпружиненный поворотный клапан. Определены параметры устойчивой работы пульсатора, среди которых расход жидкости (0,012 м<sup>3</sup>/с), амплитуда колебаний корпуса пульсатора (300 мкм), амплитуда колебаний давления рабочей жидкости (1,8 МПа) при частоте 8 Гц.

Таким образом, анализ современных исследований демонстрирует широкий спектр направлений, связанных с математическим моделированием, оптимизацией конструкций и совершенствованием методов управления манипуляторами и их элементами. Полученные результаты служат основой для разработки более эффективных и надежных конструкций манипуляторов лесных машин.

В исследовании N. Mikheev (2017) представлен подход к созданию и управлению синусоидальным пульсирующим течением в канале с использованием пульсатора, оснащённого профилированным вращающимся клапаном. Данный конструктивный

элемент обеспечивал изменение площади поперечного сечения канала в соответствии с гармоническим законом. На основе решения нестационарного уравнения Бернулли и численных расчётов, основанных на уравнениях URANS, была проведена оценка влияния инерционных сил на зависимость изменения средней скорости потока от фазы пульсаций в рабочей области экспериментального пульсатора.

Аналогичная концепция была рассмотрена в работе A. Goltsman и соавторов (2019), где создана экспериментальная система, включающая пульсатор с профилированной вращающейся заслонкой, изменяющей площадь проходного сечения канала пульсатора в соответствии с гармоническим законом. Подчёркнуто, что конструкция пульсатора должна позволять реализовывать широкий спектр пульсационных режимов течения, что повышает её универсальность.

Ключевым направлением исследования вибрационных систем управляемого воздействия представляется работа Q. Ren и др. (2021), посвящённая разработке и параметрическому анализу вибрационной системы с гидравлическим ударным роторным вибратором. Авторами предложена оригинальная гидравлическая система возбуждения колебаний, управляемая роторным ударным вибратором. Кроме того, была смоделирована система с учётом влияния трубопровода, результаты которой сравнивались с моделью, пренебрегающей такими эффектами.

Исследование G. Zhou и др. (2024) было сосредоточено на изучении характеристик вибрационной системы, управляемой поворотным клапаном рабочего органа. В ходе анализа рассматривались эффекты влияния нескольких параметров: входного давления рабочей жидкости, скорости приводного двигателя, а также объёма насоса подачи масла. Авторами было установлено, что оптимизация таких параметров, как увеличение входного давления и снижение скорости приводного двигателя, позволяет улучшить вибрационные характеристики системы, что демонстрирует практическую применимость предложенных решений.

Для гидрокинематических систем манипуляторов, использующих несколько (в частности, два)

параллельно работающих гидроцилиндра, коллективом авторов, представленным в работе Li J. et al., разработана новая гидравлическая схема, обеспечивающая надёжную и устойчивую синхронизацию работы пульсаторов. Математическая модель, созданная для анализа точности синхронизации, учитывает такие аспекты, как дисбаланс масс пульсаторов, их эксцентриситеты и коэффициенты вязкого затухания.

Проведённый анализ литературных источников и современных исследований показал, что перспективным направлением является разработка новых конструктивных решений роторных гидравлических пульсаторов с использованием методов математического моделирования. Эти подходы должны учитывать факторы, влияющие на эффективность функционирования пульсаторов, включая параметры площади поперечного сечения каналов для перетекания рабочей жидкости.

Моделирование позволит определить оптимальные энергетические, мощностные и геометрические параметры пульсаторов, включая амплитуду колебаний рабочего органа, расход жидкости и перемещения штока гидроцилиндра. Также важным является учёт характеристик трубопроводов, обеспечивающих подачу и отвод рабочей жидкости.

Целью настоящего исследования является повышение эффективности технологических операций при подготовке к выращиванию лесных культур и их последующему уходу за счёт обоснования оптимальных параметров функционирования гидравлического пульсатора, используемого в конструкции манипуляторов лесохозяйственных машин. Решение данной задачи осуществляется посредством разработки математической и имитационной моделей рабочего процесса пульсатора, что позволит определить наиболее эффективные параметры его работы.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели проводится разработка математической модели, учитывающей следующие аспекты:

- конструктивные особенности гидравлического пульсатора, включая геометрию каналов и параметры движущихся элементов;

- характеристики гидравлического цилиндра, в конструкции которого применяются пульсаторные системы;

- свойства и параметры гидравлических рукавов высокого давления, обеспечивающих подачу и отвод рабочей жидкости;

- технологические режимы функционирования системы, включая учет динамических процессов перетекания рабочей жидкости, влияющих на её энергоёмкость.

Разрабатываемая математическая модель позволяет моделировать и анализировать влияние указанных факторов на ключевые гидрокинематические характеристики рабочего процесса гидравлического пульсатора, таких как частота и амплитуда создаваемых колебаний, расход жидкости, а также энергоэффективность системы. Это обеспечивает возможность выбора оптимальных конструктивных и технологических параметров, минимизирующих потери рабочей жидкости и повышающих производительность механизма.

Таким образом, данное исследование ориентировано на совершенствование рабочих процессов манипуляторов лесной техники, что имеет прямое прикладное значение для повышения эффективности лесохозяйственных операций.

### **Материалы и методы**

Методология исследования основывается на разработке математической модели, которая учитывает конструктивные параметры гидравлического пульсатора, гидравлического цилиндра, а также соединяющих их рукавов высокого давления. Дополнительно учитываются технологические режимы работы системы с сосредоточением внимания на факторах, ограничивающих объём перетекания рабочей жидкости и её пульсационные характеристики.

Объектом исследования является гидравлический пульсатор, применяемый в манипуляторных системах лесохозяйственных машин. Предметом исследования определены гидрокинематические характеристики процесса формирования импульсов рабочей жидкости, влияющих на шток гидроцилиндра манипулятора. Особое внимание уделено взаимодействию конструктивных параметров гидравлического пульсатора и рабочих условий системы, а

также их влиянию на эффективность выполнения технологических операций.

### **Методы сбора данных**

Для проведения предварительного анализа работоспособности и эффективности исследуемого гидравлического пульсатора использовались методы математического и компьютерного моделирования. Это позволило детально выстроить и изучить динамическую модель и разработать рекомендации по её оптимизации. Формируемая математическая модель гидравлического пульсатора предоставила следующие возможности:

1. Проведение анализа влияния технологических характеристик пульсатора на потребление рабочей жидкости гидроцилиндром манипулятора.

2. Определение допустимых конструктивных параметров пульсатора, учитывая широкий спектр рабочих условий и режимов эксплуатации.

3. Выявление оптимальных рабочих и конструктивных характеристик пульсатора для обеспечения его эффективности и надёжности.

4. Подтверждение работоспособности и эффективности исследуемого устройства на этапе разработки.

Для построения модели использовались как аналитические зависимости, описывающие гидродинамические и механические процессы в системе, так и численные методы решения уравнений, фиксирующих взаимодействие компонентов гидравлического манипулятора. Среди ключевых параметров, анализируемых в модели, особую значимость имели частота и амплитуда импульсов давления, объёмы перетекания рабочей жидкости и характеристики трубопроводов высокого давления.

### **Статистический анализ данных**

Статистическая обработка результатов, полученных в ходе численного моделирования, осуществлялась с использованием лицензионного программного обеспечения Statistica 6.0. Это позволило оценить достоверность и устойчивость выявленных зависимостей, а также сформировать обоснованные рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции и режимов работы исследуемой системы.

Расчётный этап включал оценку следующих показателей:

- Расход рабочей жидкости в различных режимах работы пульсатора.
- Взаимосвязь частоты колебаний с амплитудой перемещений штока гидроцилиндра.
- Оптимальные размеры отверстий пульсатора для обеспечения требуемого уровня импульса давления.
- Влияние внешних технологических факторов (гидростатическое давление, вязкость рабочей жидкости) на рабочие характеристики системы.

### Результаты

Формирование визуального образа моделируемого гидравлического пульсатора лесного манипулятора, основные отличительные признаки которого соответствовали патенту на изобретение № 2433001, осуществлялось посредством отечественной системы автоматизированного проектирования Компас.

При моделировании гидравлический пульсатор рассматривался как элемент гидрокинематического узла лесохозяйственной машины, обладающий такими целеполагающими компонентами, как золотниковый вал 1 диаметром  $d_{зол}$  с отверстием для перетекания рабочей жидкости диаметром  $d_{к.зол}$  и корпус пульсатора 2 (рис. 1) с отверстием 3 для перетекания рабочей жидкости диаметром  $d_{к.кр} = d_{к.зол}$ . В процессе моделирования гидравлического пульсатора из его конструкции были исключены элементы, не оказывающие существенного влияния на цели моделирования. В частности, конструкция пульсатора не включала такие элементы, как соединения привода движения, обеспечивающие передачу вращения золотниковому валу (например, шлицевые или шпоночные соединения), а также элементы крепления, такие как резьбовые соединения, фиксирующие подводящие и отводящие гидравлические рукава высокого давления на корпусе пульсатора. Однако в ходе моделирования принималась во внимание геометрия системы, в частности взаимная перпендикулярность осей отверстий, обеспечивающих ввод и вывод рабочей

жидкости, которая распределяется между поршневой и штоковой полостями гидроцилиндра. Такой подход позволил сосредоточиться на исследовании ключевых гидрокинематических характеристик рабочего процесса, исключив влияние второстепенных факторов.

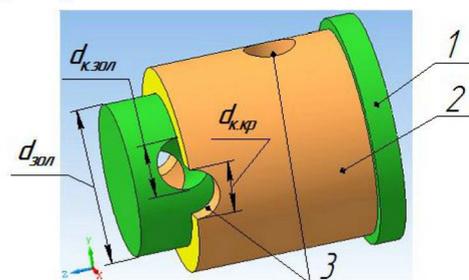


Рисунок 1. Модель гидравлического пульсатора лесного манипулятора

Источник: собственная композиция авторов

Figure 1. Model of the hydraulic pulsator of the forest manipulator

Source: author's composition

В качестве основы принималось допущение о непрерывном и равномерном вращении золотникового вала с угловой скоростью  $\omega$  (рад/с), во время которого рабочая жидкость, подводящая к корпусу пульсатора и перетекающая через золотниковый вал, обеспечивает попеременное наполнение собой поршневой или штоковой полостей гидроцилиндра манипулятора лесохозяйственной машины. При этом взаимосвязь принимаемых величин диаметров  $d_{к.зол}$  и  $d_{зол}$  создаёт условия для формирования предельного угла  $\varphi_{зол}^{np}$ , при котором начинается и завершается перетекание жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора:  $\varphi_{зол}^{np} = \arcsin(d_{к.зол} / d_{зол})$ , подчиняясь соотношению  $d_{к.зол} \leq d_{зол} \cdot \sin 22^{\circ}30'$  (мм).

Вращающийся золотниковый вал и статичный корпус пульсатора являются причиной непрерывного изменения во времени площади  $S_0$  (мм<sup>2</sup>) отверстия перетекания жидкости ( $S_0 = f(\varphi_{зол})$ , где  $\varphi_{зол}$  – угол поворота оси отверстия золотникового вала в момент времени  $t$ ):

$$S_0 = \frac{d_{к.зол}^2}{4} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \left( 180 - 2 \cdot \arcsin \frac{d_{к.зол} + d_{зол} \cdot \sin \left( \varphi_{зол} t - \arcsin \frac{d_{к.зол}}{d_{зол}} \right)}{2 \cdot d_{к.зол}} \right)}{180} - \sin \left( 180 - 2 \cdot \arcsin \frac{d_{к.зол} + d_{зол} \cdot \sin \left( \varphi_{зол} t - \arcsin \frac{d_{к.зол}}{d_{зол}} \right)}{2 \cdot d_{к.зол}} \right) \right) \quad (1)$$

При формировании графической зависимости  $S_0 = f(\varphi_{зол})$  её отличительными элементами (1) являются время  $t_{\partial p}$  (с) перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора (2), а также время  $t_{выд}$  (с) выдержки (отсутствия) указанного перетекания.

$$\begin{cases} t_{\partial p} = \frac{4 \cdot \varphi_{зол}^{np}}{\omega_{зол}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varphi_{зол}^{np}}{n_{зол}} \\ t_{выд} = \frac{180 - 4 \cdot \varphi_{зол}^{np}}{\omega_{зол}} = \frac{1}{n_{зол}} \cdot \left( 30 - \frac{2}{3} \cdot \varphi_{зол}^{np} \right) \end{cases} \quad (2)$$

где  $n_{зол}$  – частота вращения золотникового вала пульсатора, об/мин

К отличительным характеристикам системы относится суммарное время поворота золотникового вала, в течение которого оси отверстий дважды обеспечивают пропускание рабочей жидкости в гидроцилиндр манипулятора лесохозяйственной машины. Это позволяет реализовать два импульса управляющего воздействия на шток гидроцилиндра (рис. 2).

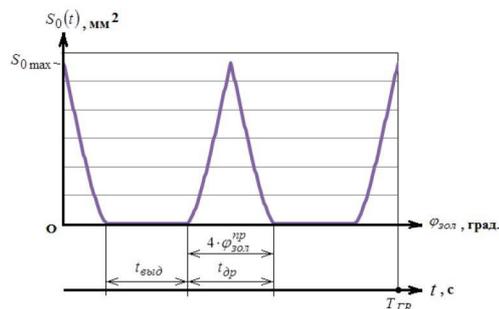


Рисунок 2. Зависимость площади отверстия перетекания жидкости от угла поворота вала  
Источник: собственная композиция авторов  
Figure 2. Dependence of the area of the liquid flow hole on the angle of rotation of the shaft

Source: author's composition

Учитывая, что в процессе перетекания рабочая жидкость полностью направляется в штоковую или поршневую полости гидроцилиндра, её расход (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ), который также зависит от скорости потока рабочей жидкости в гидравлических рукавах высокого давления (в  $\text{м}/\text{с}$ ), может быть определён с использованием зависимости (3):

$$Q_{nm(um)} = \frac{3 \cdot n_{30л} \cdot v_{nan}}{2 \cdot 10^6 \cdot \varphi_{30л}^{np}} \times$$

$$\times \frac{d \frac{d_{к.30л}^2}{4} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 180 - 2 \cdot \arcsin \frac{d_{к.30л} + d_{30л} \cdot \sin \left( \varphi_{30л} t - \arcsin \frac{d_{к.30л}}{d_{30л}} \right)}{2 \cdot d_{к.30л}} \right)}{180}}{dt} - \sin \left( \frac{d_{к.30л} + d_{30л} \cdot \sin \left( \varphi_{30л} t - \arcsin \frac{d_{к.30л}}{d_{30л}} \right)}{2 \cdot d_{к.30л}} \right) \right) \right) \right) \quad (3)$$

**Обсуждение**

Имитационное моделирование возможных соотношений диаметров  $d_{к.кр}$  ( $d_{к.30л}$ ) отверстий для перетекания рабочей жидкости через золотниковый вал с диаметром золотника  $d_{30л}$  позволило выявить допустимую зону (выделена светло-жёлтым

цветом, рис. 3, а), с поочерёдным гарантированным созданием давления рабочей жидкости в полостях гидроцилиндра лесного манипулятора, при этом указанная зона аппроксимирована ограничивающей прямой  $d_{к.30л} = 0,3827 \cdot d_{30л}$ .

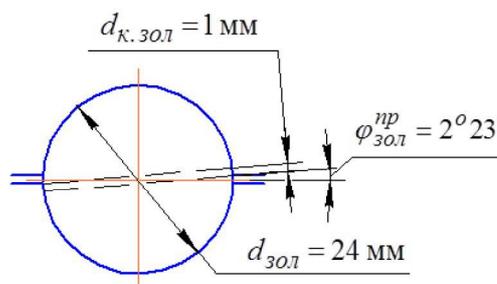
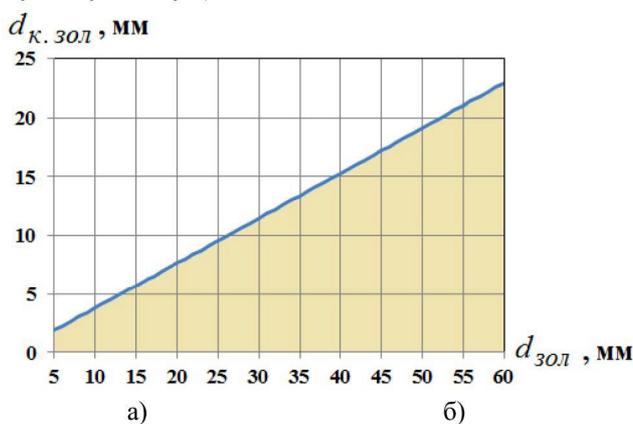


Рисунок 3. Соотношения диаметров отверстий перетекания рабочей жидкости через золотниковый вал  
Источник: собственные вычисления авторов

Figure 3. Ratios of the diameters of the holes for the flow of working fluid through the spool shaft  
Source: authors' own calculations

Исследованиями установлено, что кроме предельного угла  $\varphi_{30л}^{np}$  начала и окончания перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса

пульсатора дополнительным ограничением реальных соотношений рассматриваемых диаметров элементов гидравлического пульсатора лесного манипулятора является формируемый пульсатором объём рабочей жидкости, поглощаемый полостями

гидроцилиндра. Так, для диаметров отверстий в золотниковом валу  $d_{к.зол} = 1$  мм и диаметре золотникового вала  $d_{зол} = 24$  мм обеспечивается предельный, теоретически допустимый, угол  $\varphi_{зол}^{np} = 2^{\circ}23'$  (рис. 3, б). Однако при этом суммарный расход жидкости, прошедшей через канал золотника за 1 с будет равен  $1,28893 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с (или 0,012889332 л/с), что, несомненно, мало для формирования значительного импульса силы на штоке промышленного гидроцилиндра манипулятора лесохозяйственной машины.

При исследовании зависимости времени  $t_{dp}$  (с) перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора выявлено (рис.4, а), что возрастание частоты вращения золотникового вала пульсатора при  $\varphi_{зол}^{np} = const$  (по существу – при неизменных величинах  $d_{к.зол}$  и  $d_{зол}$ ) приводит к снижению времени перетекания  $t_{dp}$ . При  $n_{зол} = const$  увеличением диаметров отверстий  $d_{к.зол}$  (или – уменьшением диаметра золотникового вала  $d_{зол}$ , фактически при  $\varphi_{зол}^{np} \rightarrow max$ ) можно достичь увеличения значений времени  $t_{dp}$ , максимальные значения которого наблюдаются в

зоне малых частот вращения золотникового вала  $n_{зол} = 10...20$  об/мин.

Исследованием зависимости времени  $t_{dp}$  перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора от диаметров отверстий  $d_{к.зол}$  и  $d_{зол}$  выявлено (рис. 4, б), что увеличение диаметра золотникового вала (при  $d_{к.зол} = const$ ) обеспечивает снижение времени перетекания рабочей жидкости, при зависимости  $t_{dp} = f(d_{зол})$  могут быть охарактеризованы степенными линиями увеличивающегося порядка. Так, для принятой в исследование частоты вращения золотника гидравлического пульсатора  $n_{зол} = 60$  об/мин зависимость  $t_{dp} = f(d_{зол})$  при  $d_{к.зол} = 5$  мм может быть описана степенной линией  $t_{dp} = 3,31903 d_{зол}^{-1,0102}$  со средним отклонением полученных расчётных значений  $t_{dp}$  от фактических (ошибкой аппроксимации)  $\bar{A} = 0,17\% < [A] = 7\%$ ; при  $d_{к.зол} = 15$  мм – степенной линией  $t_{dp} = 21,21314 \cdot d_{зол}^{-1,1998}$  с ошибкой аппроксимации  $\bar{A} = 5,66\%$ ; при  $d_{к.зол} = 25$  мм – степенной линией  $t_{dp} = 58,94142 \cdot d_{зол}^{-1,3167}$  с ошибкой аппроксимации  $\bar{A} = 5,48\%$ .

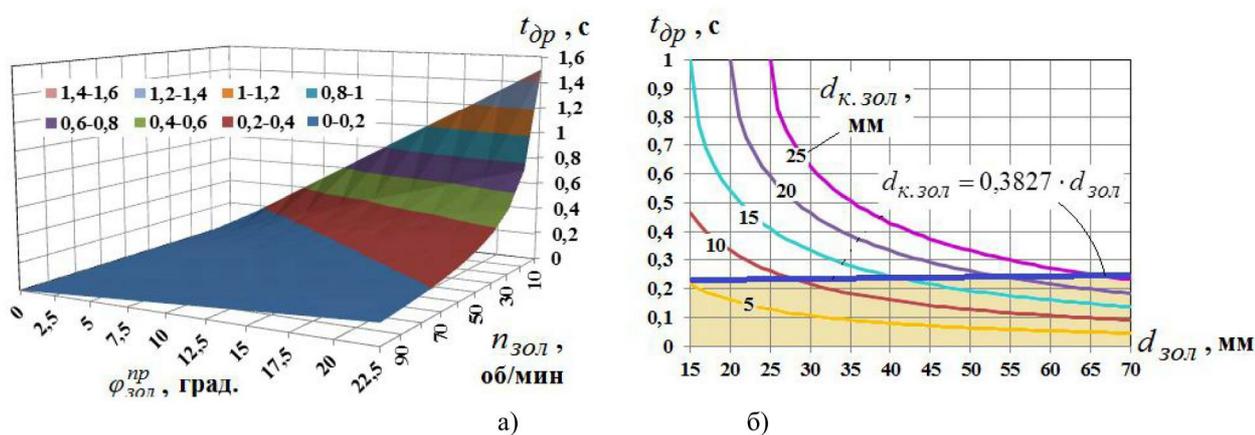


Рисунок 4. Зависимости времени перетекания жидкости по золотниковому валу от параметров пульсатора

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 4. Dependences of the time of liquid flow along the spool shaft on the pulsator parameters

Source: authors' own calculations

Совмещение графика зависимости  $t_{др} = f(d_{зол}, d_{к.зол})$  с аппроксимированной ограничивающей прямой  $d_{к.зол} = 0,3827 \cdot d_{зол}$  выявило допустимую зону (выделена светло-жёлтым цветом, рис. 4, б) вариации времени  $t_{др}$ . При этом, например, для частоты вращения золотникового вала  $n_{зол} = 60$  об/мин целесообразны следующие значения влияющих параметров гидравлического пульсатора: диаметр отверстия в золотниковом валу  $d_{к.зол} = 5$  мм при диаметре указанного вала  $d_{зол} = 15...70$  мм и более;  $d_{к.зол} = 10$  мм и  $d_{зол} \geq 28$  мм;  $d_{к.зол} = 15$  мм и  $d_{зол} \geq 43$  мм;  $d_{к.зол} = 20$  мм и  $d_{зол} \geq 54$  мм;  $d_{к.зол} = 25$  мм и  $d_{зол} \geq 65$  мм.

Исследованием зависимости времени  $t_{выд}$  (с) отсутствия перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора от диаметра указанного вала  $d_{зол}$  и частоты вращения этого вала  $n_{зол}$  выявлено (рис. 5), что увеличение диаметра золотникового вала (при  $n_{зол} = const$ ) обеспечивает возрастание значений времени  $t_{выд}$ . В частности, при диаметре отверстия в золотниковом валу  $d_{к.зол} = 5$  мм в зоне малых частот вращения  $n_{зол}$  возрастание времени  $t_{выд}$  составляет по абсолютным величинам  $0,18...0,36$  с, а при дальнейшем увеличении  $n_{зол}$  время выдержки рабочей жидкости изменяется незначительно (при средних значениях  $n_{зол} = 40...70$  об/мин время варьируется в диапазоне  $t_{выд} = 0,06...0,09$  с, при  $n_{зол} > 70$  – в диапазоне  $0,03...0,05$  с). При неизменных величинах диаметра золотникового вала ( $d_{зол} = const$ ) наибольшие величины времени  $t_{выд}$  наблюдаются в зоне малых частот вращения  $n_{зол} = 10...20$  об/мин, при этом зависимость  $t_{выд} = f(n_{зол})$  аппроксимируется полиномиальной линией второго порядка.

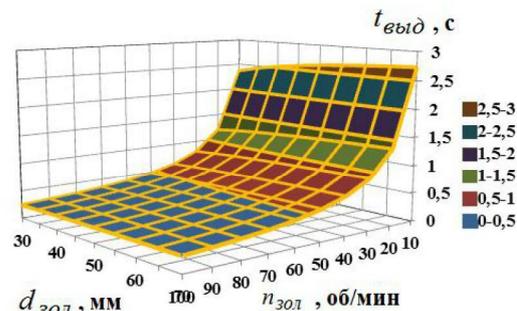


Рисунок 5. Зависимость времени отсутствия перетекания рабочей жидкости от диаметра и частоты вращения золотникового вала

Источник: собственные вычисления авторов  
 Figure 5. Dependence of the time of absence of flow of the working fluid on the diameter and frequency of the spool shaft  
 Source: authors' own calculations

Моделирование объёма  $Q_{мп}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) рабочей жидкости, прошедшей по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора и поступившей в рукава высокого давления выявило его зависимость от внутреннего диаметра  $d_{мп}$  (м) соответствующего рукава, а также от скорости  $v_{нан}$  (м/с) потока указанной жидкости ( $Q_{мп} = (\pi \cdot d_{мп}^2 / 4) \cdot v_{нан}$ ). Анализ полученных зависимостей  $Q_{мп} = f(d_{мп}, v_{нан})$  позволил установить, что для наиболее востребованных в машинах лесохозяйственной направленности рукавах высокого давления с диаметрами  $d_{мп} = 8...16$  мм величины объёма (расхода) рабочей жидкости не превышают  $Q_{мп} = 0,00101 \text{ м}^3/\text{с}$  (1,01 л/с).

Исследованием объёма рабочей жидкости, поступившей в полости гидроцилиндра, установлено, что при  $n_{зол} = const$  увеличение диаметра золотникового вала  $d_{зол}$  обеспечивает снижение объёмов рабочей жидкости, при этом зависимости  $Q_{нт} = f(d_{к.зол}, n_{зол})$  аппроксимируются полиномиальными линиями второго порядка с более интенсивными темпами уменьшения величин  $Q_{нт}$  или  $Q_{ит}$  в зоне малых частот вращения золотникового вала ( $n_{зол} = 10...20$  об/мин).

### Заключение

В ходе анализа установлено, что взаимосвязь допустимых величин диаметров золотникового вала  $d_{к.зол}$  гидравлического пульсатора и отверстия  $d_{зол}$  для перетекания сквозь него рабочей жидкости подчиняется соотношению  $d_{к.зол} \leq d_{зол} \cdot \sin 22^{\circ} 30'$  (мм).

Выявлено, что площадь  $S_0$ ) отверстия перетекания жидкости, изменяющаяся во времени, является функцией угла поворота  $\varphi_{зол}$  оси отверстия золотникового вала, а также геометрическими параметрами — диаметрами отверстия (do) и вала (Ds). Динамически изменяющаяся площадь (A(t)) оказывает существенное влияние на потребление рабочей жидкости штоковой ( $Q_{шт}$ ) или поршневой  $Q_{пн}$  полостями гидроцилиндра. При этом потребление рабочей жидкости также зависит от частоты вращения золотникового вала  $n_{зол}$  и скорости потока рабочей жидкости  $V_{нат}$  в гидравлических рукавах высокого давления, создавая комплексное гидродинамическое взаимодействие в системе.

На основании теоретического и имитационного моделирования обоснована допустимая зона варибельности диаметров отверстий (do) и вала (Ds), соответствующих отверстий. Данная зона обеспечивает стабильное и поочередное формирование давления рабочей жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра манипулятора лесохозяйственной машины. Это гарантирует устойчивую работу гидравлической системы в широком диапазоне технологических условий.

Исследования показали, что наибольшие значения времени перетекания рабочей жидкости  $t_{др} = 1 \dots 1,6$  с наблюдаются при относительно низких частотах вращения золотникового вала, находящихся в пределах  $n_{зол} = 10 \dots 20$  об/мин. Данные параметры соответствуют рабочим режимам с минимальными энергетическими потерями, но увеличенным временем формирования импульсов давления.

Для достижения допустимых величин времени перетекания  $t_{др}$  в диапазоне частот вращения золотникового вала  $n_{зол} = 60$ , было определено,

что необходимо учитывать следующие значения диаметра отверстия (do) и диаметра золотникового вала (Ds):

$d_{зол} = 15 \dots 70$  мм и более;  $d_{к.зол} = 10$  мм и  $d_{зол} \geq 28$  мм;  $d_{к.зол} = 15$  мм и  $d_{зол} \geq 43$  мм;  $d_{к.зол} = 20$  мм и  $d_{зол} \geq 54$  мм;  $d_{к.зол} = 25$  мм и  $d_{зол} \geq 65$  мм.

Особое внимание уделено минимальным значениям диаметра отверстия  $d_{к.зол} = 5$  мм в зоне низких частот вращения золотникового вала  $n_{зол}$ . В данном случае абсолютное увеличение времени перетекания жидкости  $t_{выд}$  составляет  $0,18 \dots 0,36$  с., что подчеркивает влияние малых геометрических параметров на эффективность работы гидравлической системы.

Для гидравлических рукавов высокого давления стандартной лесохозяйственной направленности с внутренними диаметрами  $d_{мп} = 8 \dots 16$  мм величины расхода рабочей жидкости не превышают  $0,00101$  м<sup>3</sup>/с (1,01 л/с).

Это соответствует требованиям, предъявляемым к механическим системам для манипуляторов в лесозаготовительных машинах.

Полученные результаты подчеркивают важность корректного выбора диаметров отверстий (do) и вала (Ds), а также частоты вращения (ns) для обеспечения эффективности работы гидравлического пульсатора. Определённые зависимости и допуски по параметрам взаимодействующих элементов системы позволяют оптимизировать рабочие процессы манипулятора лесохозяйственных машин, минимизируя энергетические затраты и обеспечивая высокую точность управления.

Результаты проведённого исследования имеют высокую прикладную значимость для лесохозяйственной отрасли, особенно в направлении проектирования и эксплуатации манипуляторных систем машин, используемых для подготовки территорий к выращиванию лесных культур и их дальнейшему уходу. Основные аспекты прикладного значения включают:

1. Полученные зависимости между конструктивными параметрами (диаметр золотникового вала (D\_s), диаметр отверстий (d\_o), частота

вращения ( $n_s$ ) и рабочими характеристиками пульсатора позволили определить оптимальные геометрические и режимные параметры. Это может быть использовано для проектирования новых высокоэффективных пульсаторов для лесных манипуляторов, способных работать в широком диапазоне нагрузок без значительных потерь энергии.

2. Снижение энергозатрат манипуляторной системы:

Оптимизация времени перетекания жидкости ( $t_f$ ), частоты вращения ( $n_s$ ) и расхода жидкости ( $Q$ ) позволяет существенно снизить гидродинамические потери, что приводит к уменьшению общего энергопотребления системы. Это особенно важно для работы лесохозяйственных машин в условиях ограниченных энергоресурсов и высокой интенсивности выполнения технологических операций.

3. Повышение производительности лесных машин:

Применение адаптированных гидравлических пульсаторов с учётом полученных параметров обеспечивает точное и равномерное управление манипулятором, улучшая качество выполнения операций, таких как расчистка территории, удаление корней и камней, перемещение грузов. Это непосредственно влияет на производительность лесоразработок и снижение затрат на их проведение.

4. Повышение надёжности техники:

Стабильная работа гидравлических систем, разработанных с учётом выявленных параметров, способствует увеличению срока службы ключевых узлов и компонентов, таких как гидроцилиндры, золотниковые валы и рукава высокого давления. Соответственно, снижается вероятность отказа оборудования, что особенно важно для техники, работающей в сложных условиях лесного хозяйства.

5. Применение в других отраслях:

Полученные результаты имеют потенциал к масштабированию на гидравлические системы манипуляторов, применяемых в смежных областях промышленности. Например, в строительной, сельскохозяйственной и дорожной технике, где активно используются гидравлические системы для выполнения точных и энергоэффективных операций.

6. Разработка адаптивных систем управления:

Результаты моделирования и зависимости, выявленные в рамках исследования, могут быть интегрированы в системы автоматизированного управления гидравлическими манипуляторами. Это включает разработку программного обеспечения, которое будет учитывать режимные характеристики пульсатора и автоматически адаптировать их под текущий технологический процесс.

7. Снижение эксплуатационных расходов:

Рассчитанные параметры расхода рабочей жидкости ( $Q$ ) и времени её перетекания ( $t_f$ ) позволяют снизить нагрузку на элементы гидравлической системы, что уменьшает износ рабочих компонентов и сокращает расходы на обслуживание техники. Кроме того, снижение энергопотребления, связанное с оптимизацией процессов, сокращает затраты на эксплуатацию машин.

8. Поддержка экологичной эксплуатации:

Благодаря снижению энергозатрат и повышению точности работы машин, использование оптимизированных гидравлических пульсаторов способствует минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Это особенно важно в лесохозяйственной отрасли, где устойчивое использование природных ресурсов является приоритетной задачей.

9. Практическое применение в образовательных и научных целях:

Результаты исследования могут быть использованы для подготовки специалистов в области гидравлических систем и лесохозяйственных технологий. Выявленные зависимости и предложенные методики оптимизации могут стать основой для создания образовательных программ, а также послужить отправной точкой для будущих научных исследований в этой области.

Таким образом, разработанная математическая модель, полученные зависимости и обоснованные рекомендации могут быть внедрены в реальные производственные условия при создании и улучшении манипуляторных систем лесохозяйственных машин. Это окажет непосредственное влияние на экономическую эффективность, производительность и экологическую устойчивость процессов лесного хозяйства.

### Список литературы

1. Zanchi G., Lucander K., Kronnäs V. [et al] *Modelling the effects of forest management intensification on base cation concentrations in soil water and on tree growth in spruce forests*. European Journal of Forest Research. 2021; 140(6): 182. DOI: 10.1007/s10342-021-01408-6.
2. Krüger M., Vogel-Heuser B., Waterman D. [et al] *Inferring Cable-Suspended End-Effector Oscillations From Hydraulic Actuators' Responses in Diaphragm Wall Hydraulic Grabs*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2025; 99: 1-16. DOI:10.1109/TASE.2024.3521599
3. Popikov P.I., Derepasko I.V., Khomenko K.G. [et al] *Analysis of studies of work processes of energy-saving hydraulic drives and devices of highly loaded technological machines and equipment*. E3s web of conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2023): EDP Sciences, 2023; 01039. DOI 10.1051/e3sconf/202346201039.
4. Попиков П.И., Четверикова И.В., Евсиков И.Д. [и др.] Исследование и обоснование компоновки и параметров гидропривода механизма подъема лесного манипулятора. Resources and Technology. 2023; 20(3): 76-93. DOI 10.15393/j2.art.2023.7063.
5. Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю. Моделирование поворотного механизма гидроманипулятора лесовозного автомобиля. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024; 5(401): 143-158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-143-158
6. Анисимов С.Е., Царев Е.М., Рукомойников К.П. Многозвенный комбинированный манипулятор для рубок ухода за лесом. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024; 250: 238-251. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.238-251
7. Yang G., Liu Y., Mingh J. *A new control method of flexible-joint manipulator with harmonic drive*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020; 234(9): 095440. DOI: 10.1177/0954406219899697
8. Saoud I., Hatim I.J., Asaad C. [et al] Design optimization and trajectory planning of a strawberry harvesting manipulator. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2024; 13: 3948-3959. DOI: 10.11591/eei.v13i6.7957.
9. Евсиков И.Д., Богданов Д.С., Попикова А.В., Конюхов А.В. Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора. Лесотехнический журнал. 2023; 3(51): 131-142. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10
10. Дорняк О.Р., Маркова Л.В., Танчук П.В., Попиков С.К. Динамическое нагружение элементов гидросистемы манипулятора лесовозной машины при выравнивании рамы поворотного устройства. Лесотехнический журнал. 2024; 14: 168-187. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10
11. Ding R., Liu Z., Li G. [et al] *High-Precision and Modular Decomposition Control for Large Hydraulic Manipulators*. Actuators. 2023; 12(11): 405. DOI: 10.3390/act12110405
12. Liu Z., Yang S., Cheng C. [et al] *Study on modeling and dynamic performance of a planar flexible parallel manipulator based on finite element method*. Mathematical Biosciences and Engineering. 2022; 20(1): 807-836. DOI: 10.3934/mbe.2023037
13. Rao P., Roy D., Chakraverty S. *Vibration Analysis of Single-Link Flexible Manipulator in an Uncertain Environment*. Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2023; 12: 231-258. DOI: 10.1007/s42417-023-01007-2.
14. Pietruś P., Gierlak P. Influence of the Manipulator Configuration on Vibration Effects. Acta Mechanica et Automatica. 2023; 17(4): 515-522. DOI: 10.2478/ama-2023-0060
15. Tuong N., Truong T., Khanh P. [et al] *Structure and Hydraulic Analysis of a 5-Ton Hydraulic Press by Simulation*. Advances in Transdisciplinary Engineering. 2024; 58: 8-15. DOI:10.3233/ATDE240597
16. Obertyukh R., Slabkyi A., Petrov O. [et al] *Substantiation of the methodology for calculating the design of a small-sized hydraulic pulse vibrator*. Vibroengineering Procedia. 2024; 56: 22-28. DOI: 10.21595/vp.2024.24512
17. Zaripova L., Shaydakov V. *Hydromechanical vibrator-pulsator for restoring the injectivity of injection wells*. E3S Web of Conferences. 2024; 524(9): 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202452403029

18. Mikheev N., Goltsman A., Paereliy A. [et al] *Experimental setup for generation and control of sinusoidal pulsatile channel flow*. Journal of Physics: Conference Series. 2017; 891: 012064. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012064
19. Goltsman A., Saushin I., Mikheev N. [et al] *Generation of sinusoidal pulsating flows in the channels of experimental setups*. Flow Measurement and Instrumentation. 2019; 66: 60-66. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.02.006
20. Ren Q., Kou Z., Wu J. [et al] *Development and Parametric Analysis of Vibration System Controlled by Hydraulic Shock Rotary Vibrator*. Shock and Vibration. 2021; 1: 1-21. DOI: 10.1155/2021/1082963
21. Zhou G., Zhao G., Wang H. *Characterization of rotary valve control vibration system for vibration stress relief applications*. Scientific Reports. 2024; 14(1): 9434. DOI: 10.1038/s41598-024-59970-z
22. Li J., Wang Y., Kong L. *Synchronization characteristics of two vibrators in a novel hydraulic coupling system*. Alexandria Engineering Journal. 2022; 61(12): 11663-11676. DOI: 10.1016/j.aej.2022.05.040

### References

1. Zanchi G., Lucander K., Kronnäs V. [et al] *Modelling the effects of forest management intensification on base cation concentrations in soil water and on tree growth in spruce forests*. European Journal of Forest Research. 2021; 140(6): 182. DOI: 10.1007/s10342-021-01408-6.
2. Krüger M., Vogel-Heuser B., Waterman D. [et al] *Inferring Cable-Suspended End-Effector Oscillations From Hydraulic Actuators' Responses in Diaphragm Wall Hydraulic Grabs*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2025; 99: 1-16. DOI:10.1109/TASE.2024.3521599
3. Popikov P.I., Derepasko I.V., Khomenko K.G. [et al] *Analysis of studies of work processes of energy-saving hydraulic drives and devices of highly loaded technological machines and equipment*. E3s web of conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2023): EDP Sciences, 2023; 01039. DOI 10.1051/e3sconf/202346201039.
4. Popikov P.I., Chetverikova I.V., Evsikov I.D. [et al.] *Research and justification of the layout and parameters of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator*. Resources and Technology. 2023; 20(3): 76-93. (In Russ.). DOI 10.15393/j2.art.2023.7063.
5. Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovsky A.Yu. *Modeling the rotary mechanism of a timber truck hydraulic manipulator*. News of higher educational institutions. Forest Journal. 2024; 5(401): 143-158. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-143-158
6. Anisimov S.E., Tsarev E.M., Rukomoynikov K.P. *Multi-link combined manipulator for forest thinning*. News of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. 2024; 250: 238-251. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.238-251
7. Yang G., Liu Y., Mingh J. *A new control method of flexible-joint manipulator with harmonic drive*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020; 234(9): 095440. DOI: 10.1177/0954406219899697
8. Saoud I., Hatim I.J., Asaad C. [et al] *Design optimization and trajectory planning of a strawberry harvesting manipulator*. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2024; 13: 3948-3959. DOI: 10.11591/eei.v13i6.7957.
9. Evsikov I.D., Bogdanov D.S., Popikova A.V., Konyukhov A.V. *Influence of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of forestry manipulator mechanisms*. Forestry Engineering Journal. 2023. 3(51): 131-142. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10
10. Dornyak O.R., Markova L.V., Tanchuk P.V., Popikov S.K. *Dynamic loading of elements of the hydraulic system of a timber truck manipulator when leveling the frame of the rotary device*. Forestry Engineering Journal. 2024; 14: 168-187. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10
11. Ding R., Liu Z., Li G. [et al] *High-Precision and Modular Decomposition Control for Large Hydraulic Manipulators*. Actuators. 2023; 12(11): 405. DOI: 10.3390/act12110405

12. Liu Z., Yang S., Cheng C. [et al] *Study on modeling and dynamic performance of a planar flexible parallel manipulator based on finite element method*. Mathematical Biosciences and Engineering. 2022; 20(1): 807-836. DOI: 10.3934/mbe.2023037
13. Rao P., Roy D., Chakraverty S. *Vibration Analysis of Single-Link Flexible Manipulator in an Uncertain Environment*. Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2023; 12: 231-258. DOI: 10.1007/s42417-023-01007-2.
14. Pietruś P., Gierlak P. *Influence of the Manipulator Configuration on Vibration Effects*. Acta Mechanica et Automatica. 2023; 17(4): 515-522. DOI: 10.2478/ama-2023-0060
15. Tuong N., Truong T., Khanh P. [et al] *Structure and Hydraulic Analysis of a 5-Ton Hydraulic Press by Simulation*. Advances in Transdisciplinary Engineering. 2024; 58: 8-15. DOI:10.3233/ATDE240597
16. Obertyukh R., Slabkyi A., Petrov O. [et al] *Substantiation of the methodology for calculating the design of a small-sized hydraulic pulse vibrator*. Vibroengineering Procedia. 2024; 56: 22-28. DOI: 10.21595/vp.2024.24512
17. Zaripova L., Shaydakov V. *Hydromechanical vibrator-pulsator for restoring the injectivity of injection wells*. E3S Web of Conferences. 2024; 524(9): 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202452403029
18. Mikheev N., Goltsman A., Paereliy A. [et al] *Experimental setup for generation and control of sinusoidal pulsatile channel flow*. Journal of Physics: Conference Series. 2017; 891: 012064. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012064
19. Goltsman A., Saushin I., Mikheev N. [et al] *Generation of sinusoidal pulsating flows in the channels of experimental setups*. Flow Measurement and Instrumentation. 2019; 66: 60-66. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.02.006
20. Ren Q., Kou Z., Wu J. [et al] *Development and Parametric Analysis of Vibration System Controlled by Hydraulic Shock Rotary Vibrator*. Shock and Vibration. 2021; 1: 1-21. DOI: 10.1155/2021/1082963
21. Zhou G., Zhao G., Wang H. *Characterization of rotary valve control vibration system for vibration stress relief applications*. Scientific Reports. 2024; 14(1): 9434. DOI: 10.1038/s41598-024-59970-z
22. Li J., Wang Y., Kong L. *Synchronization characteristics of two vibrators in a novel hydraulic coupling system*. Alexandria Engineering Journal. 2022; 61(12): 11663-11676. DOI: 10.1016/j.aej.2022.05.040

### **Сведения об авторах**

*Драпалюк Михаил Валентинович* – доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8029-2706> e-mail: [md@vglta.vrn.ru](mailto:md@vglta.vrn.ru)

✉ *Платонов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, e-mail: [paa7@rambler.ru](mailto:paa7@rambler.ru).

*Попиков Пётр Иванович* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

### **Information about the authors**

*Mikhail V. Drapalyuk* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: [md@vglta.vrn.ru](mailto:md@vglta.vrn.ru).

✉ *Aleksey A. Platonov* – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machinery Design, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, e-mail: [paa7@rambler.ru](mailto:paa7@rambler.ru).

*Piotr I. Popikov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machinery Design, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

✉ Для контактов | Corresponding author