

На правах рукописи



Поздняков Антон Константинович

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
ЛЕСОПОЖАРНОГО ГРУНТОМЕТА – ПОЛОСОПРОКЛАДЫВАТЕЛЯ  
С ГИДРОПРИВОДОМ

4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и  
переработки древесины

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, Попиков Петр Иванович

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРОКЛАДКИ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПОЛОС .....	10
1.1 Обзор способов и орудий для прокладки противопожарных полос.....	10
1.2 Анализ исследований взаимодействия рабочих органов и двигателей машин и орудий с напочвенным покровом.....	18
1.3 Выводы.....	25
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ГИДРОПРИВОДА ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ.....	26
2.1 Обоснование новой конструкции шнековых рабочих органов с рыхлящими зубьями .....	26
2.2 Математическое моделирование рабочих процессов.....	28
2.2.1 Описание взаимодействия почвенно – растительной среды с рабочими поверхностями машины .....	28
2.2.2 Компьютерная программа для вычислительных экспериментов.....	35
2.2.3 Алгоритмическая реализация модели.....	36
2.2.4 Выявление зависимостей взаимодействия шнеков с почвогрунтом и препятствиями.....	37
2.2.4.1 Исследование процесса очистки лесной поверхности от лесной подстилки для грунтометательной машины.....	37
2.2.4.2 Исследование взаимодействия шнекового рабочего органа с препятствием в виде пня.....	40

2.2.4.3	Зависимости показателей эффективности рабочего процесса ЛГП от частоты вращения шнека.....	44
2.2.4.4	Зависимости показателей эффективности рабочего процесса ЛГП от толщины слоя лесной подстилки.....	45
2.3	Теоретическая оптимизация параметров шнекового барабана....	47
2.3.1	Двухфакторная оптимизации геометрических параметров шнекового барабана.....	47
2.3.2	Оптимизация параметров рыхлящих зубьев шнекового барабана.....	51
2.4	Исследование кинематики и динамики шнекового рабочего органа на виртуальном стенде.....	54
2.4.1	Разработка виртуального стенда .....	54
2.4.2	Анализ результатов виртуальных экспериментов по преодолению препятствий шнековыми рабочими органами.....	56
2.5	Выводы.....	68
3	ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	70
3.1	Программа и методика проведения полевых испытаний по методу полнофакторного эксперимента.....	70
3.2	Изготовление экспериментального образца новой машины с шнековым рабочим органом.....	71
3.3	Аппаратура для определения энергетических показателей шнековых рабочих органов.....	75
3.4	Выводы.....	77
4	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ.....	78

4.1	Определение качественных показателей шнековых рабочих органов лабораторной установки.....	78
4.2	Определение динамических параметров рабочих процессов шнеков.....	80
4.3	Экспериментальная оптимизация параметров зубьев шнекового барабана.....	83
4.3.1	Анализ экспериментальных данных по выявлению закона распределения выходных величин.....	83
4.3.2	Построение регрессионной модели влияния на полноту очистки обрабатываемой полосы параметров шнекового рабочего органа	85
4.3.3	Построение регрессионной модели влияния на потребляемую мощность параметров шнекового рабочего органа.....	88
4.3.4	Сравнительные исследования теоретической (компьютерной) и экспериментальной моделей.....	90
4.3.5	Экспериментальная оптимизация параметров зубьев шнекового рабочего органа.....	92
4.4	Выводы.....	94
5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГРУНТОМЕТА ПОЛОСОПРОКЛАДЫВАТЕЛЯ С ГИДРОПРИВОДОМ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ.....	96
5.1	Технико-экономические показатели опытного образца ЛПП.....	96
5.2	Методика расчета технико-экономических показателей.....	98
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	101
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	103
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	123
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	125

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** В современном мире, в связи с глобальным изменением климата, возрастают требования к защите лесов, поэтому необходимо повысить уровень их охраны. Это потребовало значительного увеличения количества противопожарного оборудования и физических ресурсов лесопожарной службы. Одним из известных и широко применяемых методов является создание на некотором расстоянии от движущегося пожара минерализованной полосы, которая производится различными лесными плугами, канавокопателями, фрезами, дисковыми боронами, фрезерными полосопрокладывателями и грунтометами. Наиболее эффективными являются грунтометальные машины, однако они не имеют рабочего оборудования для сталкивания в стороны лесной подстилки, валежника, порубочных остатков.

Более всего отвечают требованиям перемещения различных материалов шнеки, однако их рабочие процессы недостаточно исследованы. В связи с этим тема диссертации, направленная на обоснование параметров шнековых рабочих органов лесопожарного грунтомета – полосопрокладывателя с гидроприводом, дающим возможность эффективно создавать противопожарные полосы и тушить кромку огня лесного низового пожара, является актуальной.

Диссертация подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, в рамках научного проекта «Аспиранты» № 20 – 38 – 90082, а также в рамках выполнении госбюджетной тематики ВГЛТУ, шифр: 116092210006, с 2021 по 2025 гг.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Исследованиями физико-механических свойств лесной подстилки, строение лесных подстилок в типичных биогеоценозах во взаимосвязи с эколого-ботаническими характеристиками напочвенного покрова, занимались такие ученые как Коршун В.Н., Александров В.А, Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырёва Л.Г. Теория воздействия ходовых систем лесохозяйственных агрегатов отражена в работах Хитрова Е.Г., Григорьева И.В, Бурмистровой О.Н.

Разработке почвообрабатывающих орудий для прокладки минерализованных полос посвящены работы Бартенева И.М., Драпалюка М.В., Алябьева А.Ф., Рыбака А.Т., Гнусова М.А, Ступникова Д.А. и др., однако этих исследований недостаточно для обоснования параметров и рабочих режимов лесохозяйственного грунтомета – полосопрокладывателя (ЛГП).

**Цель и задачи исследования.** Повышение эффективности прокладки противопожарных полос, путем обоснования параметров и режимов работы шнековых рабочих органов (ШРО) с гидроприводом лесохозяйственного грунтомета – полосопрокладывателя.

Поставлены следующие задачи:

1) Обосновать новую конструкцию ЛГП с гидроприводом шнековых рабочих органов;

2) Разработать математическую модель рабочего процесса ЛГП, с учетом влияния параметров новых шнековых рабочих органов с рыхлящими зубьями на качественные показатели, динамическую нагруженность и энергоемкость грунтомета – полосопрокладывателя;

3) Обосновать рациональные параметры шнековых рабочих органов с гидроприводом с повышенными качественными показателями очистки потока грунта от напочвенного покрова, снижением динамической нагруженности и энергоемкости ЛГП;

4) Определить технико–экономические показатели опытного образца ЛГП с гидроприводом шнековых рабочих органов с повышенной эффективностью профилактики лесных пожаров.

**Объектом исследования** являются конструкция шнекового рабочего органа, напочвенный покров и рабочие процессы грунтомета – полосопрокладывателя.

**Предметом исследования** являются кинематика и динамика гидропривода шнекового рабочего органа ЛГП и качественные показатели очистки потока грунта от напочвенного покрова.

### **Научная новизна работы:**

1) Новая конструкция ЛГП с гидроприводом, отличающийся повышением качественных показателей очистки потока грунта от напочвенного покрова, снижением динамической нагруженности и энергоемкости шнековых рабочих органов;

2) Математическая модель рабочего процесса ЛГП, отличающаяся учетом влияния параметров новых шнековых рабочих органов с рыхлящими зубьями на качественные показатели, динамическую нагруженность и энергоемкость;

3) Обоснованные рациональные параметры шнековых рабочих органов с гидроприводом, отличающиеся повышенными качественными показателями очистки потока грунта от напочвенного покрова, снижением динамической нагруженности и энергоемкости;

4) Технико – экономические показатели опытного образца ЛГП с гидроприводом шнековых рабочих органов, отличающиеся повышением эффективности профилактики лесных пожаров.

**Теоретическая значимость работы** заключена в разработке математической модели взаимодействия шнековых рабочих органов с рыхлящими зубьями с напочвенным покровом и исследовании влияния основных параметров рабочего органа на эффективность очистки противопожарной полосы от растительных горючих материалов.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке новой конструкции ЛГП с гидроприводом шнековых рабочих органов; двух программ для ЭВМ, позволяющих оперативно производить выбор оптимальных режимов работы ЛГП при проведении профилактики и тушения лесных низовых пожаров в производственных условиях.

Результаты исследований внедрены в проектной организации ООО «Сталь – Синтез» при изготовлении опытного образца ЛГП, в СГБУ «Воронежский лесопожарный центр» при прокладке противопожарных полос с применением опытного образца ЛГП и в учебный процесс кафедры механизации лесно-

го хозяйства и проектирования машин ФГБОУ «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

**Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования** базировались на научных трудах российских и зарубежных ученых в области обработки почвы, перемещения различных материалов шнековыми рабочими органами. Эксперимент проводился по общепринятой методике, обработка результатов вычислительного и лабораторного экспериментов проводилась с использованием методов математической статистики.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1) Новая конструкция ЛГП с гидроприводом шнековых рабочих органов, позволяющая обеспечить повышение качественных показателей очистки потока грунта от напочвенного покрова, снижение динамической нагруженности и энергоемкости ЛГП;

2) Математическая модель рабочего процесса ЛГП, позволяющая решать задачи влияния параметров новых шнековых рабочих органов с рыхлящими зубьями на качественные показатели, динамическую нагруженность и энергоемкость грунтомета – полосопрокладывателя;

3) Обоснованные рациональные параметры шнековых рабочих органов с гидроприводом, позволяющие повысить качественные показатели очистки потока грунта от напочвенного покрова и снизить динамическую нагруженность и энергоемкость ЛГП;

4) Техничко–экономические показатели опытного образца ЛГП с гидроприводом шнековых рабочих органов с повышенной эффективностью профилактики лесных пожаров.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.**

Достоверность полученных результатов исследований подтверждена теоретическими выкладками и результатами испытаний лабораторной установки в полевых условиях и их высокой сходимостью, применением современной тензометрической аппаратуры, а также обработкой экспериментальных данных методами математической статистики.

Основные положения диссертационной работы докладывались на трех международных и четырех всероссийских научно-технических конференциях (г. Воронеж, 2022, г. Минск 2022, г. Санкт-Петербург 2022 г.), г. Красноярск, 2023, г. Петрозаводск 2022, г. Москва 2022 г, научно-практических конференциях ФГБУ ВО ВГЛТУ, г. Воронеж (2020 – 2023 гг.).

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа соответствует п. 5 «Компоновка, типы, параметры и режимы работы машин лесохозяйственных и лесопромышленных производств» паспорта специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

**Личный вклад** соискателя состоит в проведении анализа технологий и технических средств прокладки противопожарных полос, разработке новой конструкции и математической модели рабочего процесса ЛГП, обосновании рациональных параметров шнековых рабочих органов с гидроприводом, позволяющих повысить качественные показатели очистки потока грунта от напочвенного покрова и снизить динамическую нагруженность и энергоемкость предлагаемой грунтометательной машины.

**Публикации.** Опубликовано 16 печатных работ, в том числе 5 научных статей в научных журналах, включенных в перечень ВАК, 2 патента на изобретения, 2 статьи в базе данных Scopus, 2 свидетельства госрегистрации программ для ЭВМ, в т.ч. 6 статей без соавторов.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает введение, 5 разделов, общие выводы и рекомендации, библиографический список и приложения. Общий объем работы содержит 131 страницу машинописного текста, включая 102 страницы основного текста, 11 таблиц, 65 рисунков, библиографический список из 161 наименования.

# 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРОКЛАДКИ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПОЛОС

## 1.1 Обзор способов и орудий для прокладки противопожарных полос

Для обработки почвы и прокладки минерализованных полос применяется плуг лесной шнековый ПШ – 1. (рисунок 1.1), который включает корпус 4, нож 2 и два шнековых барабана 1, навесное устройство 3, карданный вал 5, цепная передача 6, стойку 7.

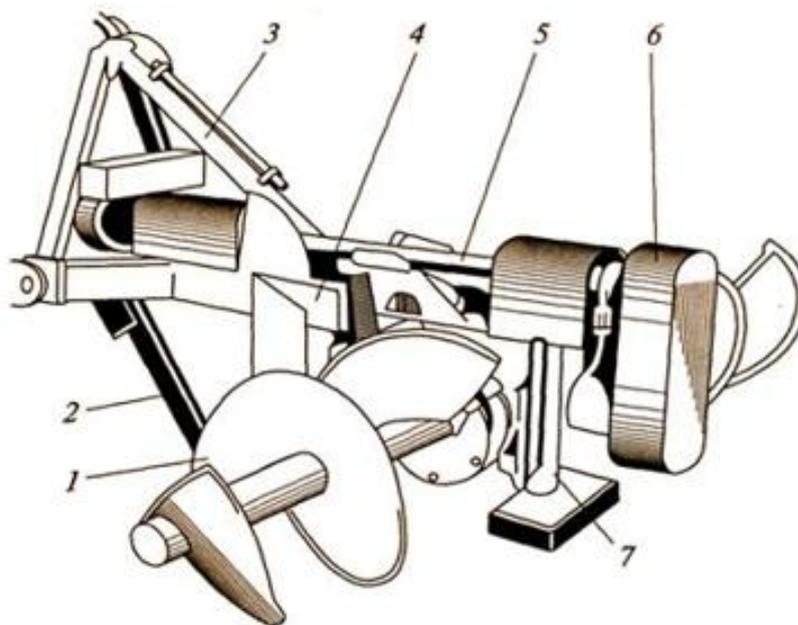
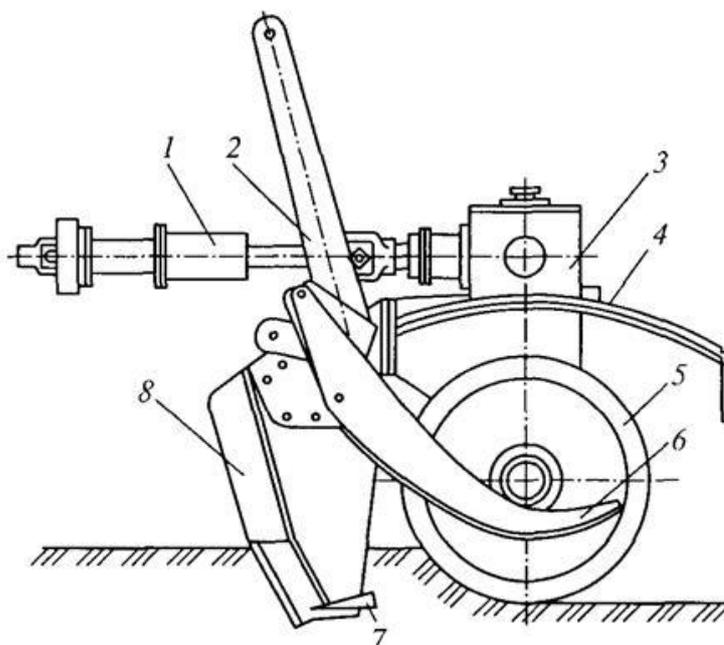


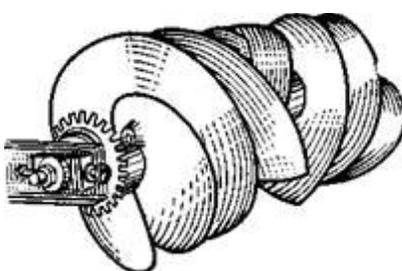
Рисунок 1.1 – Плуг шнековый ПШ – 1

Фреза лесная шнековая ФЛШ – 1,2 (рисунок 1.2) предназначена для полосной обработки почвы на вырубках с переувлажненными почвами, при этом создаются микроповышения в виде гряды. Эта фреза может быть использована для прокладки противопожарных полос. Привод фрезы осуществляется ВОМ трактора от карданной передачи 1 и редуктора 3, шнековые барабаны 5 вращаются с частотой 220 об/мин. Конструкция фрезы включает также: 2 – рама с

навесным устройством; 4 – защитный кожух; 5 – фрезерный барабан; 6 – ограничительный полоз; 7 – рыхлительная лапа; 8 – черенковый нож.



а)



б)

а – схема фрезы; б – общий вид шнека

Рисунок 1.2 – Фреза лесная шнековая ФЛШ – 1,2

Для послойного фрезерования разработана машина МПФ-1,3 (рисунок 1.3), которая может производить основную полосную обработку почв [56, 60, 61, 62]. При движении машины клинообразная форма передней части рамы 1 раздвигает растительные остатки. Карданный вал 2 вращает шнековые роторы 7 через редуктор 3. Машина содержит: 4 – отражатель; 5 – заднее ограждение; 6 – скат 8 – горизонтальный нож; 9 – боковой нож; 10 – средний нож.

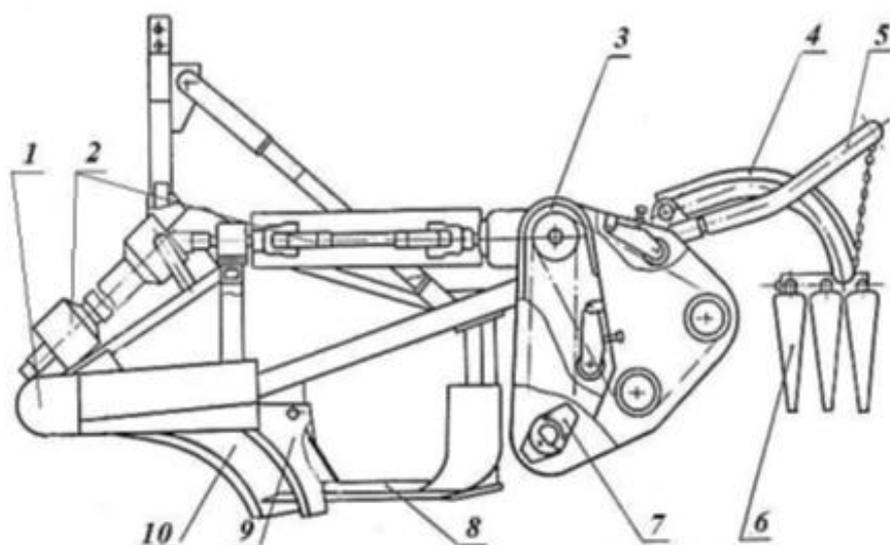
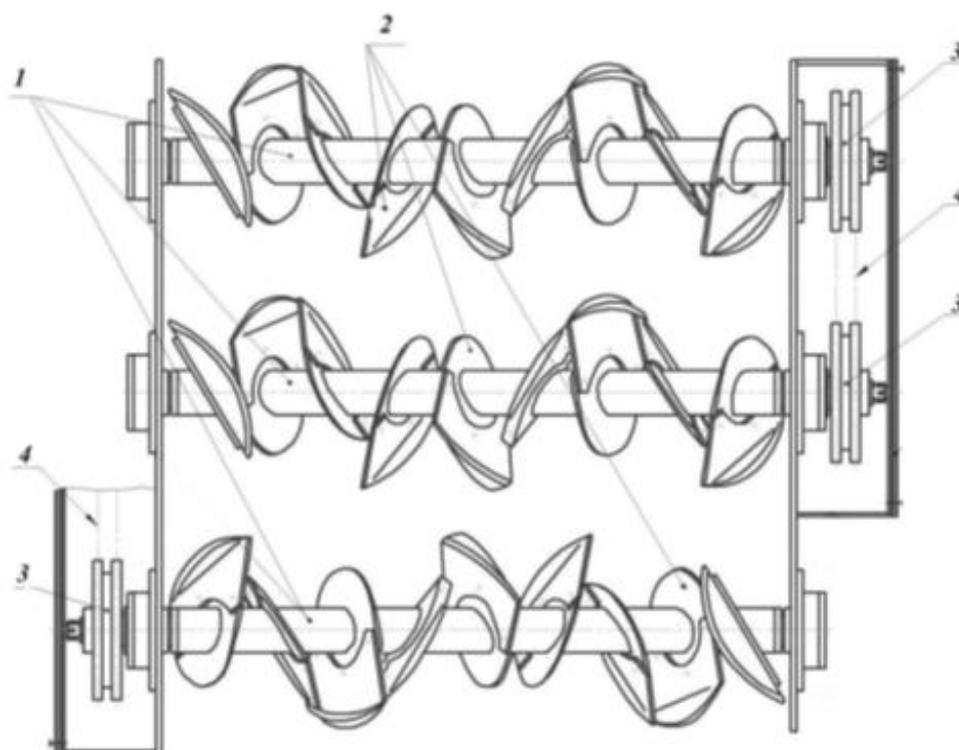


Рисунок 1.3 – Схема машины для послойного фрезерования лесных почв

На рисунке 1.4 представлена конструкция роторов и их привода машины МПФ-1,3. Первый ротор рыхлит нижний, второй – средний, а третий – верхний слой почвы [5 – 8, 11, 13].



1 – валы роторов; 2 – роторы, 3 – звездочки привода валов роторов; 4 – цепные передачи

Рисунок 1.4 – Конструкция роторов и их привода

Первый ротор вращается со скоростью – 324, второй со скоростью 390, а третий – 432 мин<sup>-1</sup>.

В настоящее время наиболее эффективна мульчерная технология, которая обеспечивает минимальное нанесение повреждений лесу. Основное назначение мульчеров – измельчение древесно-кустарниковой растительности (мульчирование) в мелкую щепу без нанесения вреда экологии местности (рисунок 1.5). Рабочие органы мульчера могут агрегатироваться с различными самоходными машинами на передней или задней навеске, а также на манипуляторах [9, 10, 123, 154, 155].

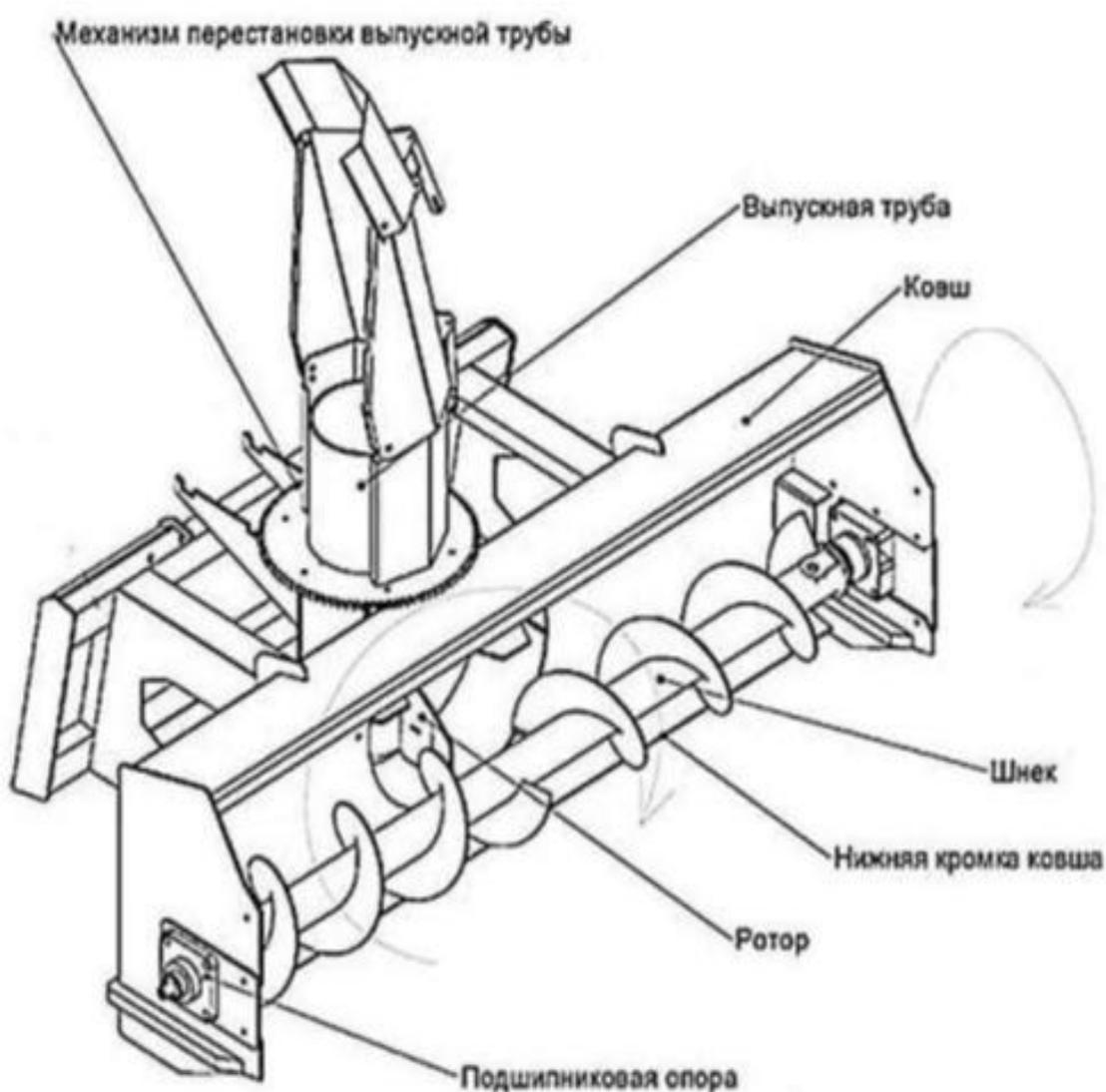


Рисунок 1.5 – Мульчер

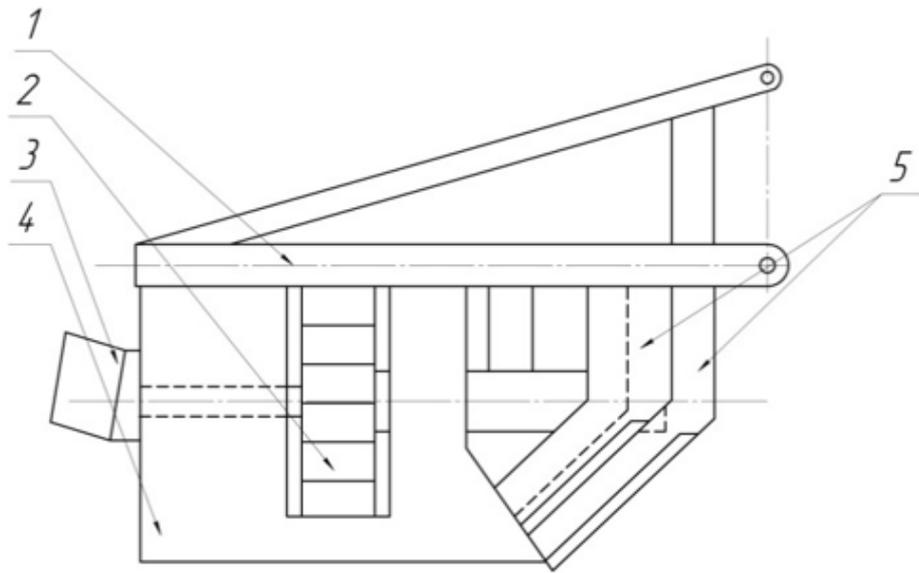
В ВГЛТУ разработан опытный образец лесопожарного грунтомета – полосопрокладывателя (рисунок 1.6) [14,15, 17, 20, 27, 31, 32].



Рисунок 1.6 – Пожарный грунтомет – полосопрокладыватель

Привод фрез метателей от ВОМ трактора Т – 150К. К недостаткам следует отнести: выброс струи грунта под прямым углом к кромке огня; незначительная толщина слоя грунта, накладываемая на площадь пожара – всего лишь 4 кг грунта на 1 м<sup>2</sup>, то есть толщина слоя составляет всего лишь 0,5 см. [69].

На рисунке 1.7 изображена лесопожарная грунтометательная машина, разработанная аспирантами ВГЛТУ Ступниковым Д.С. и Шаровым А.В., включающая 1 – механизм навески; 2 – ротор-метатель; 3 – гидромотор; 4 – кожух – рыхлитель; 5 – предохранительные ножи.



а)



б)

а – схема лесопожарной грунтометательной машины; б – процесс метания  
грунта

Рисунок 1.7 – Лесопожарная грунтометательная машина

Наклонные ножи 5 под тупым углом предохраняют рабочий орган при наезде на пни. Фреза – метатель осуществляет выброс грунта из окон кожуха рыхлителя в необходимую сторону на расстояние до 20 м, а также может создавать минерализованные полосы шириной до 10 метров [98, 127-130].

Известен пожарный грунтомет – полосопрокладыватель (рисунок 1.8) [94, 99], в котором фрезы – метатели 8 и 9с приводом от гидромоторов 10 и 11 не фрезеруют поверхность задернелой почвы, т.к. находятся над ее поверхностью, а только отбрасывают мелкие фракции почвы из почвенного вала в требуемом направлении. Почвенный вал предварительно измельчается сферическими дисками 5 с вырезной режущей кромкой 6 с приводом от гидромоторов 7. Сферические диски 5 установлены на раме шарнирно с помощью коленчатого рычага 15 с предохранительной пружиной 17, это позволяет при наезде на пни устанавливать сферические диски на нулевой угол атаки и перекачиваться через препятствие. Грунтомет – полосопрокладыватель с помощью навесного устройства 2 навешивается на трактор, на котором устанавливаются дополнительные гидронасосы. На передней части рамы 1 установлены опорные катки 18 для регулировки глубины обработки почвы, рыхлитель 16 и шнек 3 с приводом от гидромотора 4, который удаляет напочвенный покров с горючими растительными остатками из почвенного вала. Метаемый поток грунта направляется в нужном направлении гидроцилиндром 12 через кронштейн 13 направляющим кожухом 14.

Недостатком данной конструкции грунтомета – полосопрокладывателя является отсутствие предохранительного устройства шнековых рабочих органов, которые при наезде на препятствия деформируют винтовую поверхность, а также забиваются растительными остатками. Кроме того, параметры шнековых рабочих органов не обоснованы и рабочие процессы не исследованы, поэтому данная конструкция принята нами за прототип [16, 18, 19, 96].

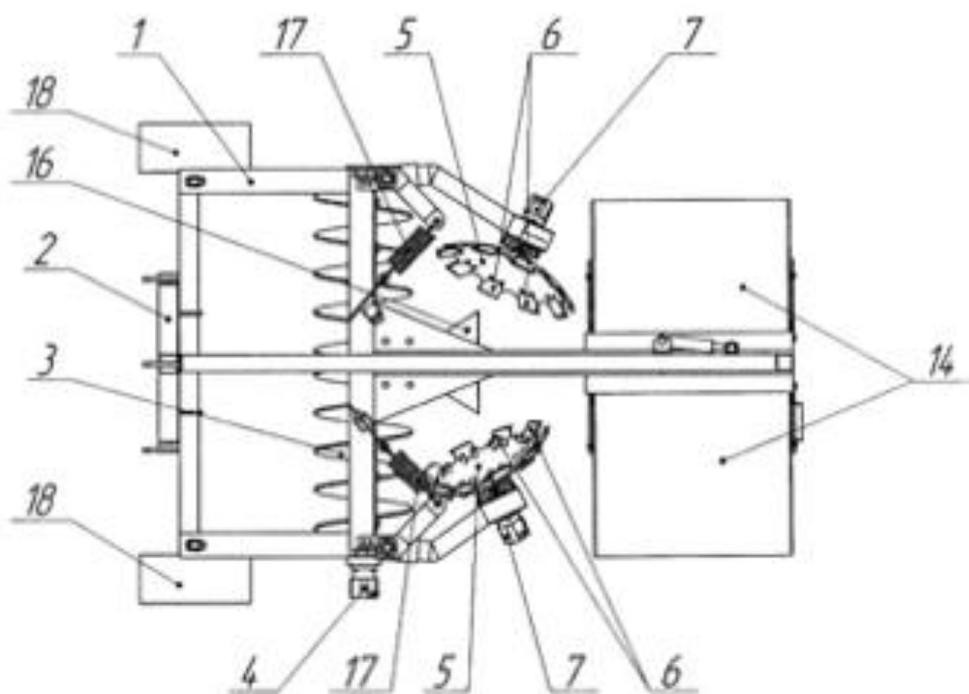
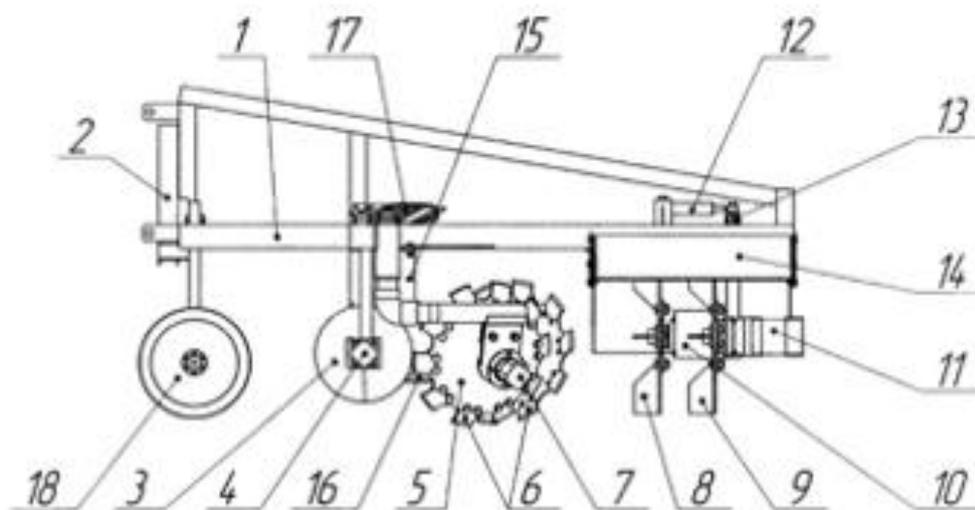


Рисунок 1.8 – Схема лесопожарного грунтомета – полосопрокладывателя

Для исследований кинематики и динамики гидропривода рабочих органов машин и орудий с лесным напочвенным покровом и его параметров необходимы дальнейшие исследования [21, 22, 26, 28 – 30, 98].

## 1.2 Анализ исследований взаимодействия рабочих органов и движителей машин и орудий с напочвенным покровом

Физико-механические свойства лесной подстилки изучали многие исследователи, которые установили, что лесная почва включает в себя минеральное основание 1 (рисунок 1.9), толщиной  $h_m$ , и лесная подстилка 2 толщиной  $h_p$ . Кроме того лесная почва включает единичное включение 3 в виде корней диаметром  $d_v$  и пней высотой  $h$  [33, 37, 40, 41, 63, 64, 56, 1 – 4].

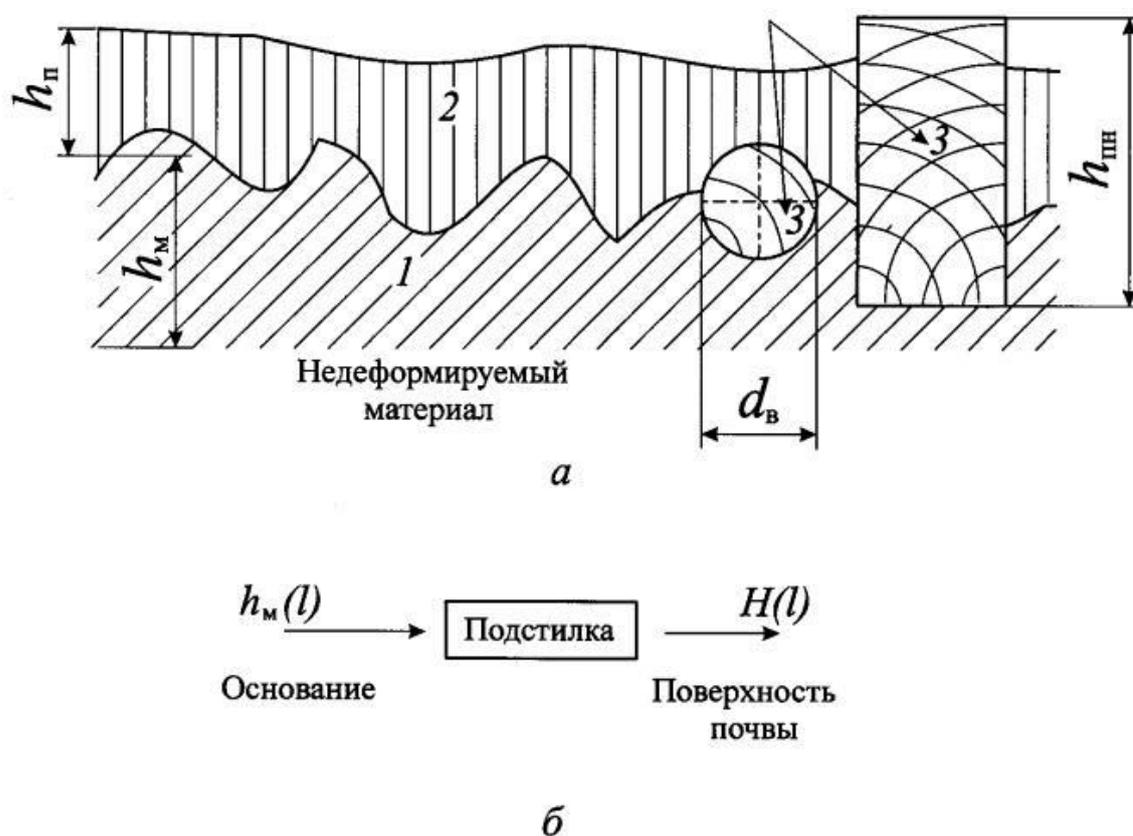


Рисунок 1.9 – Вертикальная структура модели лесной почвы (а) и схема динамической системы (б)

Проводились теоретические исследования деформации подстилки с использованием модели Друккера – Прагера и проведены расчеты в системе MathCAD (рисунок 1.10., 1.11.) При удельном давлении на почву 30 кПа (ДТ-75Б), то при толщине подстилки 15 см, движители тракторов не повреждают минеральную часть [24, 34 – 36, 85, 131, 156].

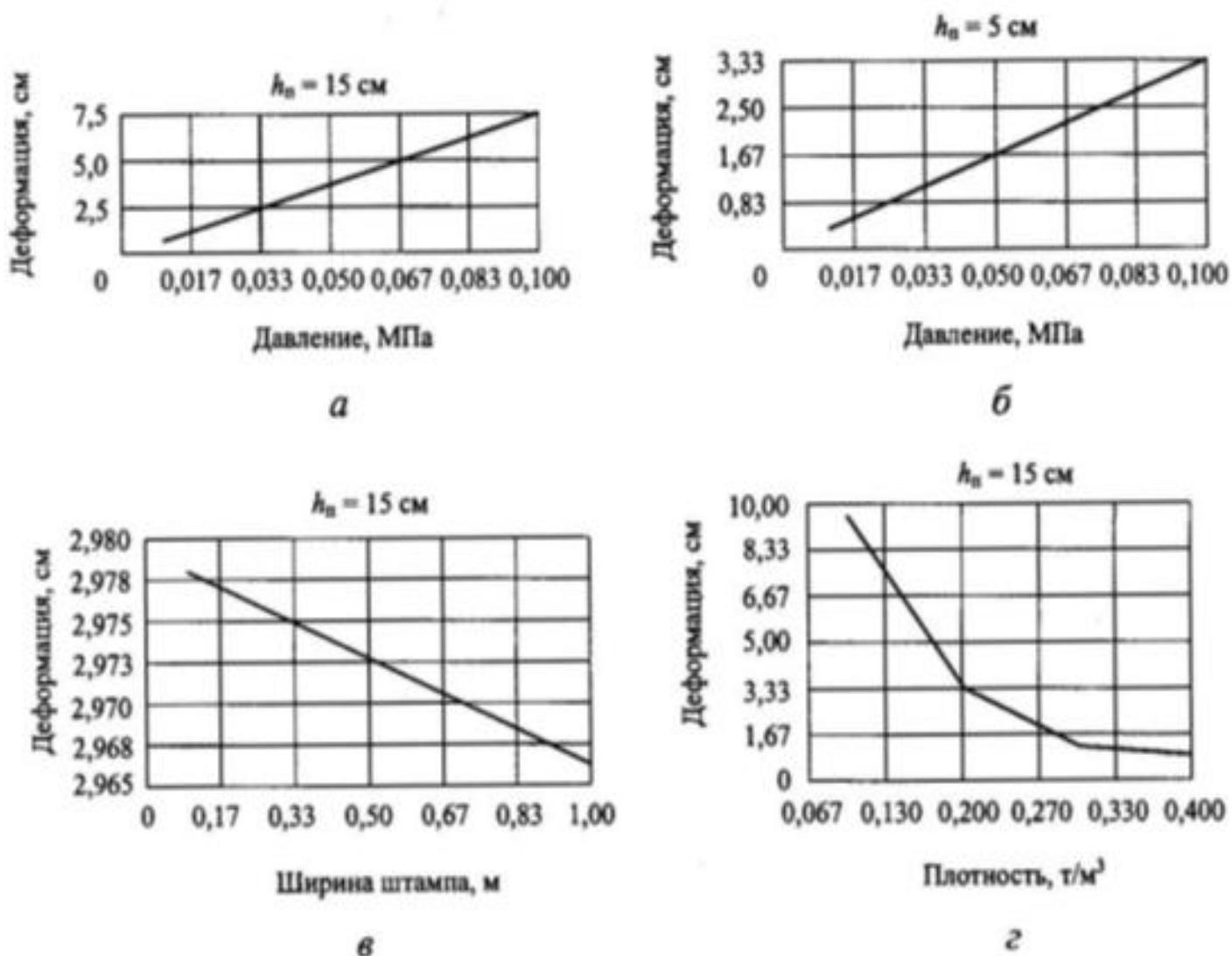
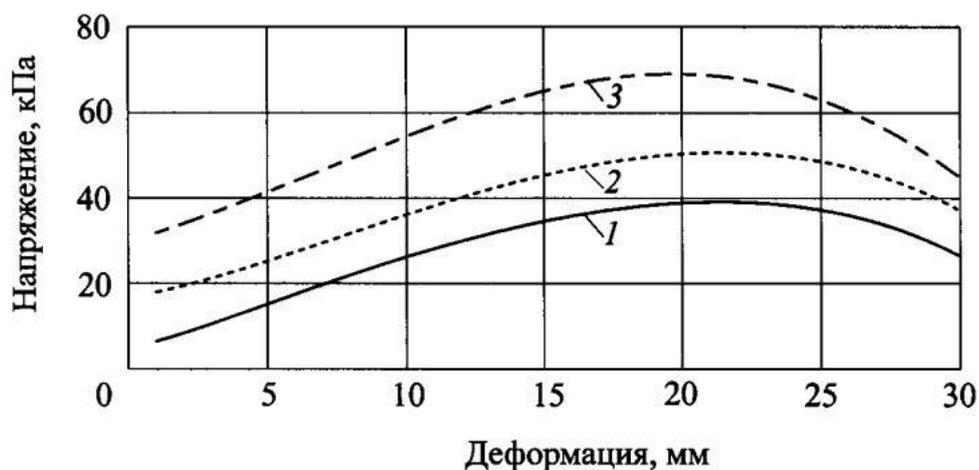


Рисунок 1.10 – Графики деформации напочвенного покрова в зависимости от подстилки высотой 15 см (а), высотой 5 см (б), ширины штампа, м (в), плотности почвы, т/м<sup>3</sup> (г)

Как видно из рисунка 1.10 (а, б) линейный возрастающий, деформация изменяется от 1 см до 7,5 см, или убывающий характер (в), от 2,978 см до 2,965 см, а зависимости деформации от плотности представляет собой ломанную убывающую кривую (рисунок 1.10, г.).



1 – предельное напряжение 4 кПа; 2 – 12 кПа; 3 – 30 кПа

Рисунок 1.11 – Зависимость касательного напряжения в слое подстилки от деформации при сдвиге

В результате экспериментальных исследований, движение лесохозяйственных агрегатов получены микропрофили раскорчеванной трехлетней выруб-ки (рисунок 1.12).

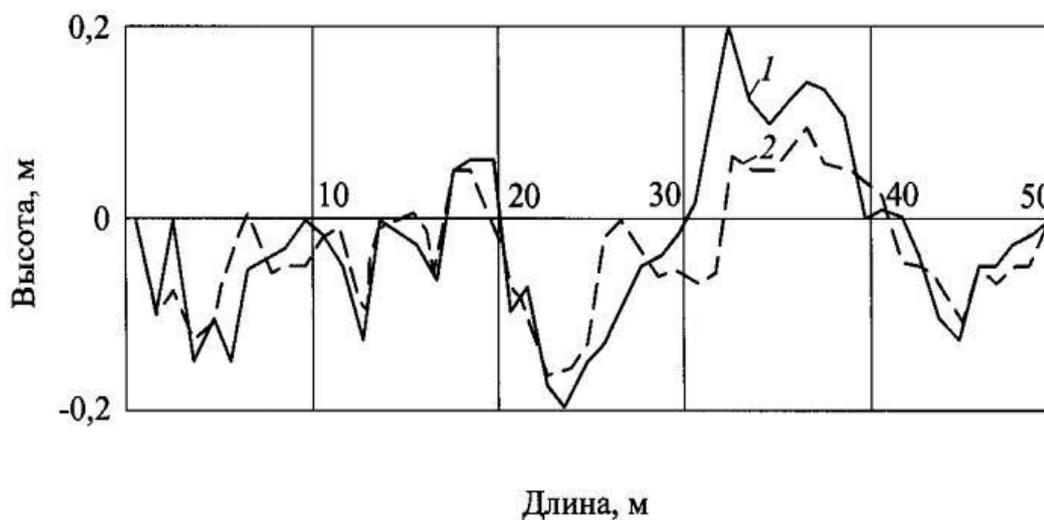


Рисунок 1.12 – Микропрофили минерального основания лесной почвы

Из анализа исследований шнекового рабочего органа, выполненных в ра-ботах [46, 49, 57-59], установлены следующие результаты.

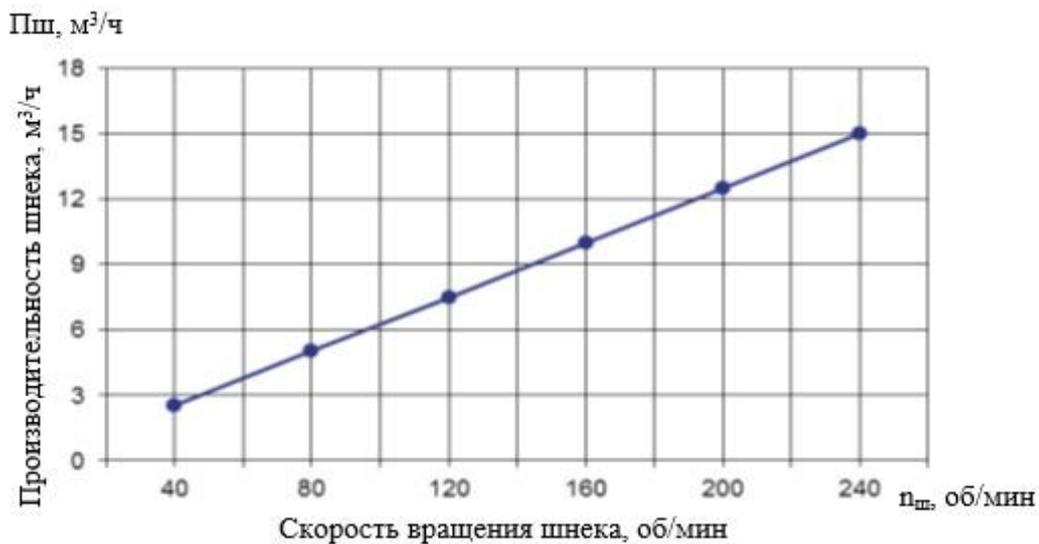


Рисунок 1.13 – Производительность шнекового рабочего органа в зависимости от скорости вращения шнеков. (При  $D_{ш} = 0,18$  м.,  $S_{ш} = 0.15$  м.  $K_n = 0,28$  – коэффициент наполнения шнека)

Как видно из графика (рисунок 1.13) с увеличением оборотов шнека увеличивается производительность шнека прямо пропорционально оборотам шнека от  $2,56$  м³/ч до  $15,38$  м³/ч.

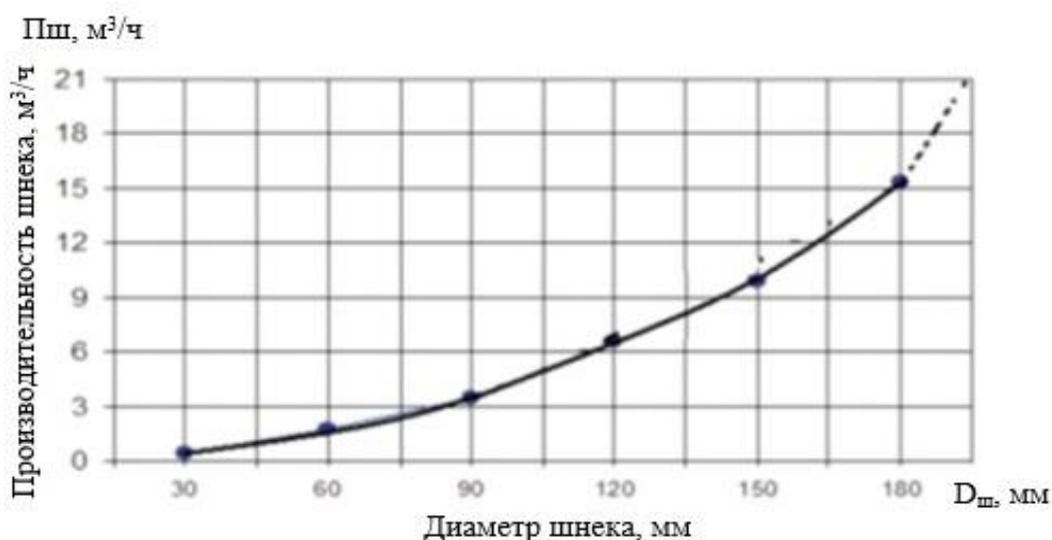


Рисунок 1.14 – Зависимость производительности шнекового рабочего органа от диаметра ( $D_{ш}$ ) шнека

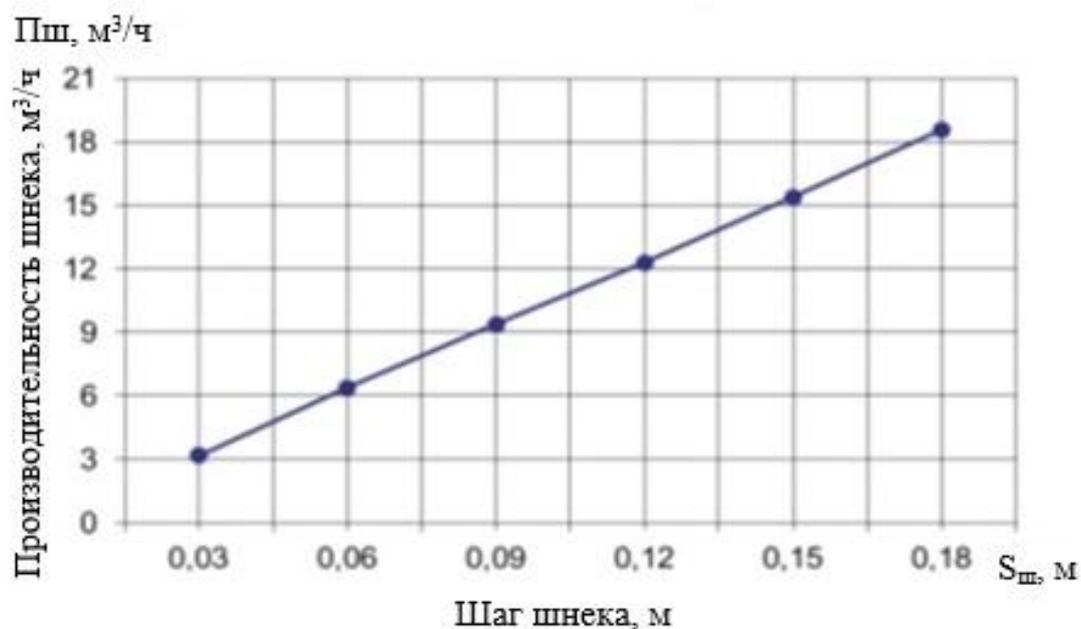


Рисунок 1.15 – Зависимость изменения производительности шнекового рабочего органа в зависимости от шага ( $S_{ш}$ ) шнека. (При  $D_{ш} = 0,18$  м.,  $S_{ш} = 0,15$  м.,  $n_{ш} = 240$  об/мин.,  $K_{н} = 0,28$  – коэффициент наполнения шнека)

На рисунке 1.14 представлена не линейная зависимость изменения производительности шнекового рабочего органа от диаметра ( $D_{ш}$ ) шнека. При изменении диаметра шнека от 30 до 180 мм производительность шнека плавно возрастает до  $15,0$  м³/ч.

Как видно из рисунка 1.15, производительности ( $S_{ш}$ ) шнека при диаметре шнека  $D_{ш} = 0,18$  м., частоте вращения  $n_{ш} = 240$  об/мин и коэффициенте наполнения шнека  $K_{н} = 0,28$ ) происходит по линейной зависимости. Следует что, при шаге шнека  $0,03$  м производительность шнека равна  $3$  м³/ч, а при шаге шнека  $0,18$  м шнека производительность шнека увеличивается до  $18$  м³/ч.

В работе Согина А. В. Средства гидромеханизации для очистки донных осадков в водоемах [121] проведены теоретические исследования шнековых рабочих органов для донного грунта (рисунок 1.16). Как видно из рисунка на шнековый рабочий орган действуют крутящий момент  $M$ , продольная сила  $Q_x$ , сила тяжести донного грунта  $mg$ , боковая сила  $r_x$  и сила сопротивления  $F$ . Подача шнекового рабочего органа происходит со скоростью  $V$ . Проведено

обоснование параметров средств гидромеханизации для очистки донных осадков в водоемах, на основании теоретических и экспериментальных исследований.

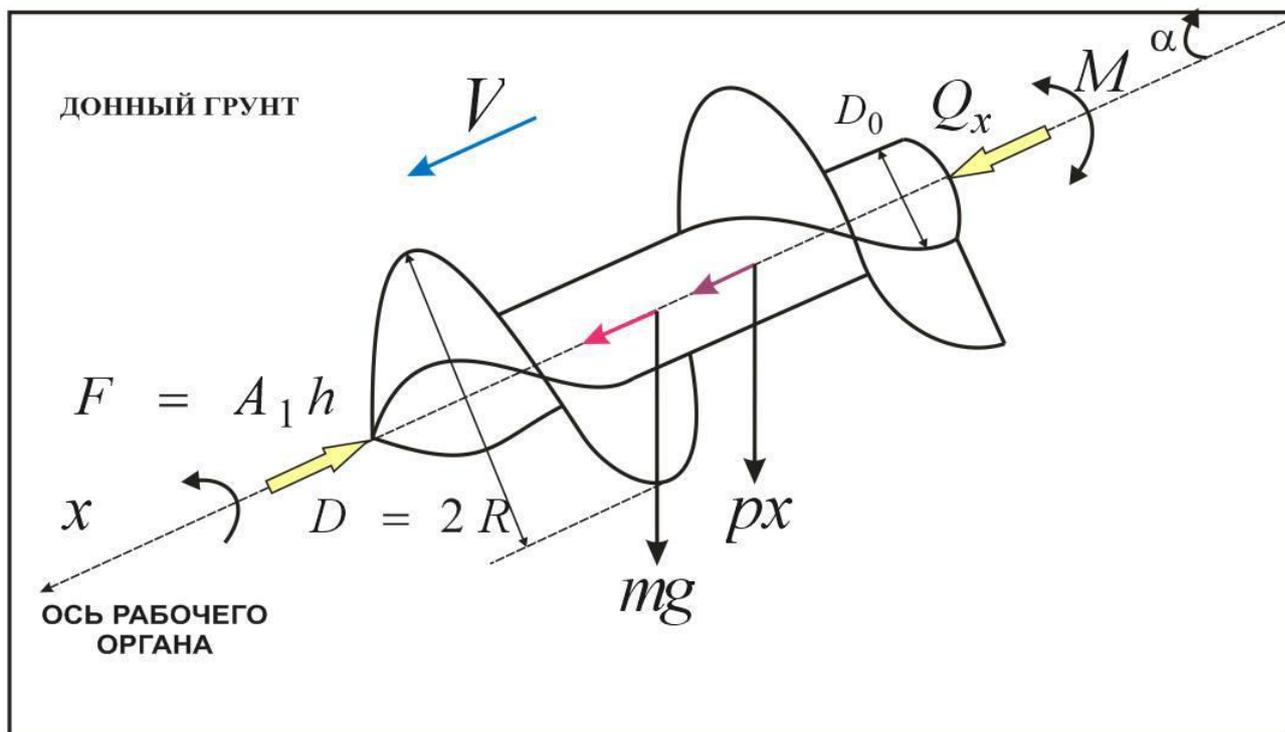
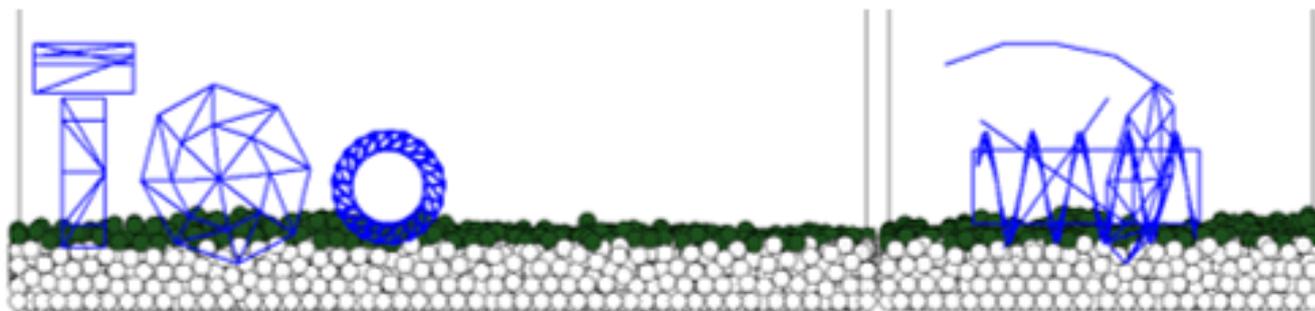


Рисунок 1.16 – Система сил, действующих на шнековый рабочий орган

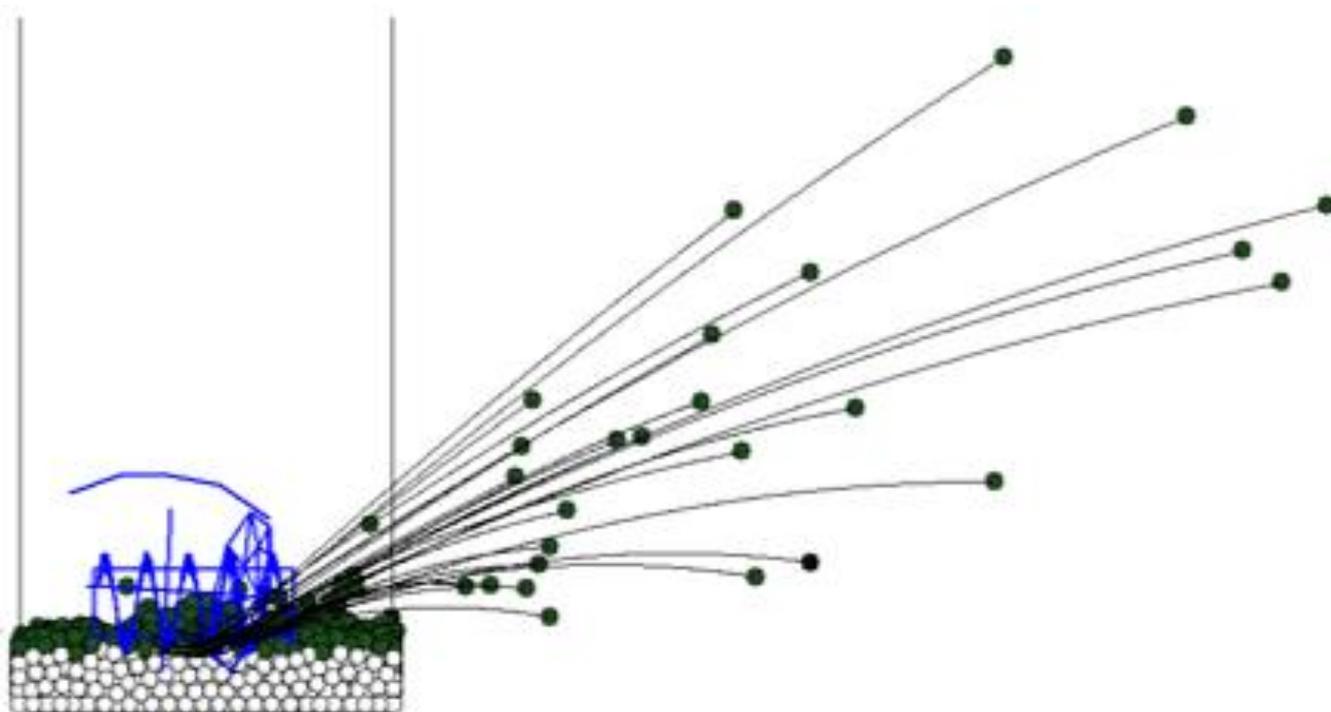
В работе Малюкова С.В. при разработке пожарного грунтомета – полоскопрокладывателя использовано математическое моделирование. Оно предназначено для выяснения особенностей работы грунтомета в различных режимах и определения оптимальных конструктивных и технологических параметров. Моделирование основано на методе динамики частиц [71, 72]. В модели учитывается только правая половина грунтомета. Взаимодействие элементов между собой и с рабочими поверхностями считается упруго-вязким [76].

Перед началом моделирования создается случайная плотная упаковка элементов в области пространства в виде прямоугольного параллелепипеда размерами  $L_y \times a$  (соответственно ширина, длина, высота) (рисунок 1.17). Верхние слои элементов (темные на рисунке 1.17) представляют в модели напочвен-

ный покров. Нижние слои элементов – слабо связный грунт, предназначенный для тушения пожаров.



а)



б)

Рисунок 1.17 – Представление в модели пожарного грунтометалосопрокладывателя и лесного грунта (а); моделирование процесса метания грунта (б)

### 1.3 Выводы

1. Проведен анализ применяемых конструкций технологических машин и оборудования со шнековыми рабочими органами для перемещения различных материалов. Общим недостатком грунтометательных машин является отсутствие рабочего оборудования для сталкивания в стороны лесной подстилки, ваlejника, порубочных остатков.

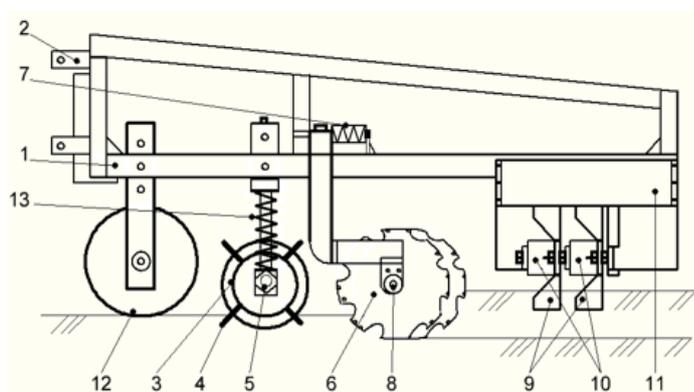
2. Анализ теоретических исследований, выполненный на основе имитационного моделирования в системе SolidWorks, при которой 3 – D модель рабочего органа импортируется в среду SolidWorks Flow Simulation, где определена область расчета интегральных сумм давлений, оказываемых почвенной средой на всю рабочую поверхность рабочего органа, показал что можно определить значение его тягового сопротивления и выявить концентрации напряжений на рабочих поверхностях, подверженных наибольшему износу и дает возможность проектировать новые рабочие органы с учетом энергоемкости и долговечности.

3. При разработке пожарного грунтомета – полосопрокладывателя использовано математическое моделирование. Предназначенное для выяснения особенностей работы грунтомета в различных режимах и определения оптимальных конструктивных и технологических параметров. Моделирование должно быть основано на методе динамики частиц.

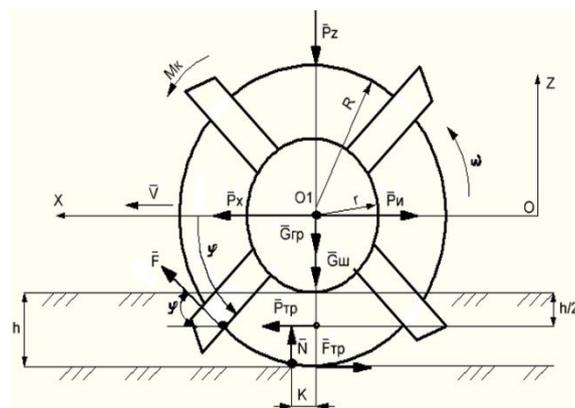
## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ГИДРОПРИВОДА ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

### 2.1 Обоснование новой конструкции шнековых рабочих органов с рыхлящими зубьями

В предлагаемой конструкции лесопожарного грунтомета – полосопрокладывателя (ЛПП) повышение производительности достигается за счет улучшения качества рыхления и удаления напочвенного покрова с порубочными остатками и предохранения шнека от перегрузок при преодолении препятствий (Патент № RU 2762 160 С1 от 10.06.21 г) [92, 93]. На рисунке 2.1 представлен общий вид ЛПП (а), расчётная схема шнека (б).



а)



б)

$V$ -скорость трактора;  $G_{ш}$ ,  $G_{гр}$ -силы тяжести шнека и грунта на шнеке;  $P_x$ -сила тяги трактора;  $P_y$ -сила инерции в начале движения;  $P_z$ - сила пружины предохранителя;  $P_{тр}$ -сила трения грунта о винтовую поверхность;  $F_{тр}$ - сила сопротивления перекатыванию шнека;  $N$ -реакция почвы;  $M_k$ -крутящий момент гидромотора;  $F$ -сила сопротивления взаимодействия шнека с напочвенным покровом

Рисунок 2.1 – Общий вид грунтомета – полосопрокладывателя с гидроприводом (а), расчетная схема шнека (б)

При движении агрегата рабочая жидкость от гидросистемы трактора подается в гидромоторы привода шнеков 5, сферических дисков 6, фрез – метателей 9 и 10. Шнек 5 рыхлит напочвенный покров зубьями 4, а винтовая поверхность шнека сдвигает растительные остатки в стороны, что бы они не попадали в поток грунта. За счет удаления напочвенного покрова сферические диски лучше заглубляются в почву и создают более качественный почвенный вал перед фрезами метателями 9 и 10. За счет этого увеличивается производительность фрез – метателей и объем грунта, метаемый в одну или обе стороны, увеличивается толщина слоя почвы противопожарной полосы до 6 сантиметров на расстоянии 5...6 метров от оси движения агрегата. При наезде на препятствие шнек сжимает демпфирующую пружину и перекачивается через препятствие, при этом срабатывают предохранительные клапаны гидромотора. Регулировка демпфирующей пружины и пружины предохранительного клапана подобрана таким образом, что при наезде на препятствие сначала срабатывает демпфирующая пружина 13, а за тем срабатывает предохранительный клапан гидромотора, поэтому шнеки перекачиваются через пень за счет крутящего момента гидромотора. Сферические диски также имеют предохранительные пружины 7, которые позволяют дискам при наезде на препятствие отклоняться на нулевой угол атаки и перекачивается через препятствие, что облегчает перекачивание через препятствие. При этом также срабатывают предохранительные клапан гидромотора 8. Фрезы метатели 9 снабжены шарнирными ножами, которые при наезде на препятствие отклоняются, при этом также возможно срабатывание предохранительных клапанов гидромоторов 10. Опорные катки 12 предназначены для регулировки глубины обработки почвы, а также перекачиваются через препятствие.

Такое исполнение ЛГП позволяет повысить эффективность его работы за счет удаления напочвенного покрова с порубочными остатками из потока грунта, улучшения заглубляемости вырезных сферических дисков и рыхления почвенного вала, а также предохранения ленты шнека от деформации при преодолении пней [74, 75, 77, 101-104].

## 2.2 Математическое моделирование рабочих процессов

### 2.2.1 Описание взаимодействия почвенно – растительной среды с рабочими поверхностями машины

Для выяснения особенностей работы грунтомета в различных режимах и определения оптимальных конструктивных и технологических параметров составлена математическая модель:

$$\begin{cases} I_{\text{пр}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{q_M}{2\pi} p \cdot \frac{d\varphi}{dt} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_3} (F_{ij}^y + F_{ij}^B) r_i - \sum_{k=1}^{N_{II}} (F_{ik}^y + F_{ik}^B) r_i - (M_{\text{ст}} + K_{\text{вт}}) \frac{d\varphi}{dt}; \\ \frac{dp}{dt} = \frac{1}{k_p} \left( q_H n_H - \frac{q_M}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} - a_y \cdot p \right), \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $J_{\text{пр}}$  – приведенный момент инерции гидромотора, шнека и передачи к оси вращения шнека, кгм<sup>2</sup>;

$\varphi$  – угол поворота шнека, рад;

$q_H, q_M$  – рабочие объемы насоса и гидромотора, м<sup>3</sup>/об;

$p$  – рабочее давление в гидроприводе, Па;

$N_{\text{Э}}$  – количество элементов напочвенного покрова, шт.;

$N_{\text{II}}$  – количество элементарных поверхностей шнека, шт.;

$r_i$  – расстояние от оси шнека до взаимодействующего  $i$ -го элемента напочвенного покрова, м;

$F_{ij}^y$  и  $F_{ik}^y$  – проекции силы упругости, Н;

$F_{ik}^y$  и  $F_{ik}^B$  – проекции силы вязкого трения, Н;

$M_{\text{ст}}$  – момент силы сухого трения при вращении шнека, Нм;

$k_{\text{вт}}$  – коэффициент вязкого трения, Па с;

$n_H$  – частота вращения насоса, с<sup>-1</sup>;

$k_p$  – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, м<sup>5</sup>/(Нс);

$a_y$  – коэффициент утечек, м<sup>3</sup>/(сПа).

Для определения силы общего сопротивления через проекции сил упругости и сил вязкого трения, составлены уравнения динамики конечных элементов:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\text{Э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{\text{Э}}} (F_{xij}^V + F_{xij}^B) + \sum_{k=1}^{N_{\text{П}}} (F_{xik}^V + F_{xik}^B); \\ m_{\text{Э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{\text{Э}}} (F_{yij}^V + F_{yij}^B) + \sum_{k=1}^{N_{\text{П}}} (F_{yik}^V + F_{yik}^B); \\ m_{\text{Э}} \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{\text{Э}}} (F_{zij}^V + F_{zij}^B) + \sum_{k=1}^{N_{\text{П}}} (F_{yik}^V + F_{yik}^B) - m_{\text{Э}} g, \end{array} \right. \quad (2.2)$$

где  $m_{\text{Э}}$  – масса элемента, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Моделирование основано на методе динамики частиц. Эти элементы взаимодействуют между собой и с рабочими поверхностями машины: ротором, диском и т.п. В модели учитывается только правая половина грунтомета [50, 52, 53, 107, 108, 116].

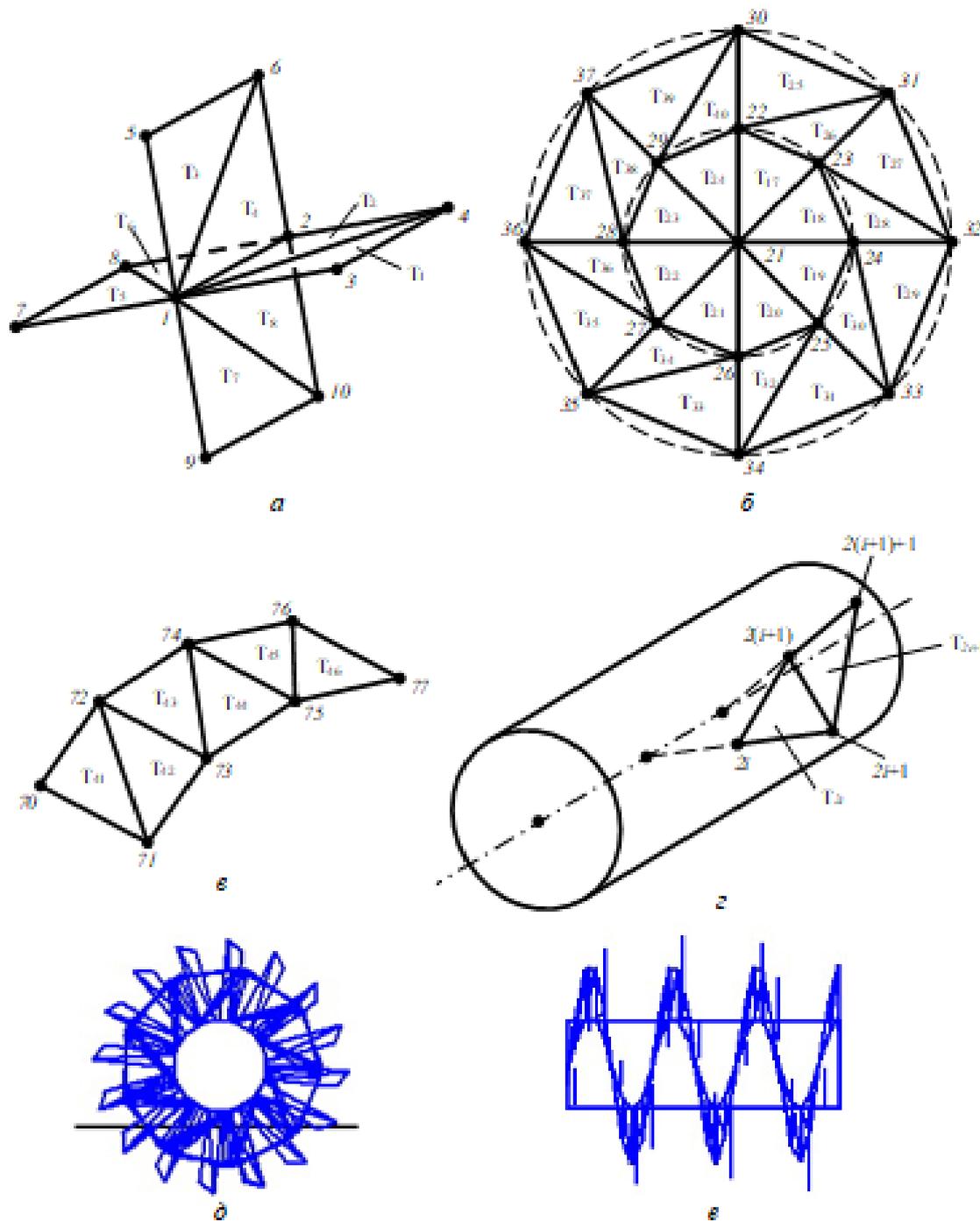
Машина движется в направлении  $OY$  и взаимодействует с элементами грунта шнековым рабочим органом, дисками, роторами, шитками – направляющими. В результате формируется поток грунта, движущийся по параболической траектории.

Шнек и ротор представлен в виде множества треугольников (рисунок 2.2, а, б, в, г, д, е) [51, 73].

Существенная вычислительная сложность связана с расчетом сил, стороннего действия рабочих поверхностей машины на элементы грунта и приводящих к деформации, фрагментации грунта, сообщению фрагментам грунта скорости. Параллельно производится и расчет обратных сил, действующих на рабочие поверхности машины, по которым рассчитывается потребляемая машиной мощность. Расчет взаимодействия элементов грунта и рабочих поверхностей машины основывается на предварительном определении внедрения элемента в поверхность, для чего используется аппарат аналитической геометрии.

Шнековый барабан в модели представлен цилиндрической поверхностью,

оказывающей уплотняющее воздействие на почву и винтообразной полосой, состоящей из 96 треугольников, построенных на 98 базовых точках (рисунки 2.2, *г*, *д*, *е*).



*а* – ротор; *б* – сферический диск; *в* – щиток – направитель; *г* – шнековый барабан; *д*, *е* – зубья

Рисунок 2.2 – Представление в модели как совокупности элементарных треугольников

Для моделирования вращения ротора производится изменение координат базовых точек 3 – 10 ротора с течением времени  $t$ :

$$x_1 = x_{ЦР}; \quad y_1 = y_{ЦР} + \frac{B_L}{2}; \quad z_1 = z_{ЦР};$$

$$x_2 = x_{ЦР}; \quad y_2 = y_{ЦР} - \frac{B_L}{2}; \quad z_2 = z_{ЦР};$$

$$x_{3+2i} = x_{ЦР} + R_P \cos\left(\varphi_P + i \frac{\pi}{2}\right); \quad y_{3+2i} = y_{ЦР} + \frac{B_L}{2};$$

$$z_{3+2i} = z_{ЦР} + R_P \sin\left(\varphi_P + i \frac{\pi}{2}\right); \tag{2.3}$$

$$x_{4+2i} = x_{ЦР} + R_P \cos\left(\varphi_P + i \frac{\pi}{2}\right); \quad y_{4+2i} = y_{ЦР} - \frac{B_L}{2};$$

$$z_{4+2i} = z_{ЦР} + R_P \sin\left(\varphi_P + i \frac{\pi}{2}\right), \tag{2.4}$$

где  $(x_{ЦР}, y_{ЦР}, z_{ЦР})$  – центральные координаты для ротора, м;

$B_L$  – ширина лопатки ротора, м;

$R_P$  – радиус ротора, м.

На основе базовых точек  $P_i$ , перемещающихся в пространстве, составляются треугольники, для которых позже производится расчет взаимодействия с элементами грунта:  $T_1(P_1, P_3, P_4)$ ;  $T_2(P_1, P_2, P_4)$ ;  $T_3(P_1, P_5, P_6)$ ;  $T_4(P_1, P_2, P_6)$ ;  $T_5(P_1, P_7, P_8)$ ;  $T_6(P_1, P_2, P_8)$ ;  $T_7(P_1, P_9, P_{10})$ ;  $T_8(P_1, P_2, P_{10})$ .

Размещение в пространстве базовых точек диска производится следующим образом. Координаты центра диска (точка  $P_{21}$ ) составляют:

$$x_{21} = x_{Ц}; \quad y_{21} = y_{Ц}; \quad z_{21} = z_{Ц}.$$

Координаты точек малого круга с номерами от 22 до 29 рассчитываются по формулам:

$$x_i = x_{Ц} + \frac{1}{3} \left( R_{CF} - \sqrt{R_{CF}^2 - R_D^2} \right) \tag{2.5}$$

$$y_i = y_{Ц} + \sqrt{R_{C\Phi}^2 - \left( R_{C\Phi} - \frac{1}{3} \left( R_{C\Phi} - \sqrt{R_{C\Phi}^2 - R_D^2} \right) \right)} \cos \left( \omega_D t + (i - 22) \frac{\pi}{4} \right);$$

$$z_i = z_{Ц} + \sqrt{R_{C\Phi}^2 - \left( R_{C\Phi} - \frac{1}{3} \left( R_{C\Phi} - \sqrt{R_{C\Phi}^2 - R_D^2} \right) \right)} \sin \left( \omega_D t + (i - 22) \frac{\pi}{4} \right),$$

где  $R_D$  и  $R_{C\Phi}$  – радиусы диска и сферичности диска, м;  
 $\omega_D$  – скорость вращения диска, рад/с.

Точки координат для большого круга с номерами от 30 до 37 рассчитываются следующим образом:

$$x_i = x_{Ц} + R_{C\Phi} - \sqrt{R_{C\Phi}^2 - R_D^2};$$

$$y_i = y_{Ц} + R_D \cos \left( \omega_D t + (i - 30) \frac{\pi}{4} \right); \quad (2.6)$$

$$z_i = z_{Ц} + R_D \sin \left( \omega_D t + (i - 30) \frac{\pi}{4} \right).$$

Для поворота диска на угол  $\beta$  относительно вертикальной плоскости производится следующее преобразование координат [95, 97, 100, 109, 115, 150-153].

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{(x_{i1} - x_{Ц})^2 + (z_{i1} - z_{Ц})^2}; \\ \varphi = \begin{cases} \arctan \frac{z_{i1} - z_{Ц}}{x_{i1} - x_{Ц}}, & x_{i1} - x_{Ц} \geq 0; \\ \arctan \frac{z_{i1} - z_{Ц}}{x_{i1} - x_{Ц}} + 180^\circ, & x_{i1} - x_{Ц} < 0; \end{cases} \\ x_{i2} = x_{Ц} + r \cos(\varphi + \beta); \\ y_{i2} = y_{i1}; \\ z_{i2} = z_{Ц} + r \sin(\varphi + \beta), \end{array} \right. \quad (2.7)$$

где  $r$  и  $\varphi$  – полярные координаты базовых точек в системе координат, связанной с центром диска;

$(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$  и  $(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$  – координаты точки  $P_i$  относительно оси ОУ.

Для установки диска на угол атаки  $\alpha$  относительно оси OZ производится аналогичное преобразованием координат базовых точек (рисунок 2.3).

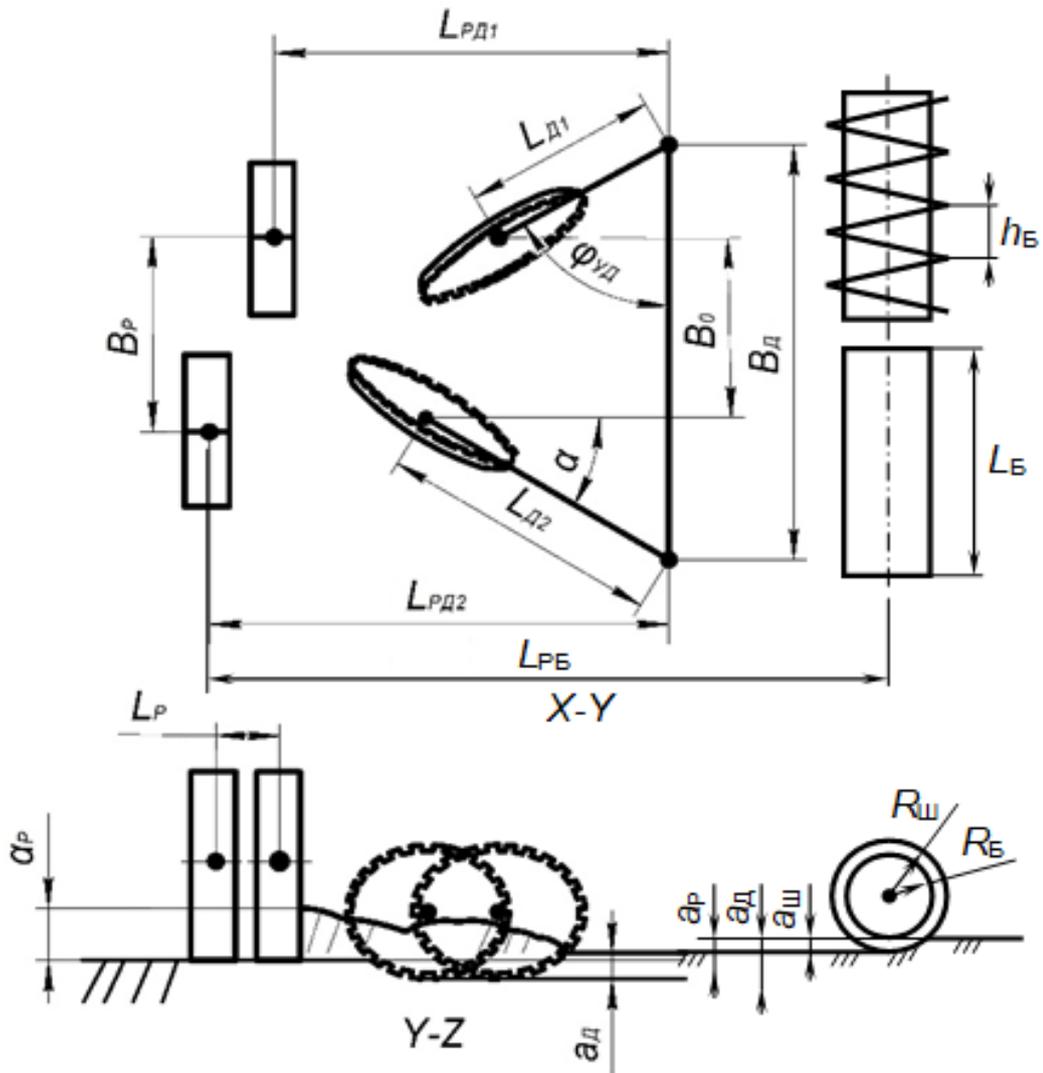


Рисунок 2.3 – Основные геометрические параметры ЛГП

Распределение 98 базовых точек и составление на них 96 треугольников производится исходя из тех же принципов, которые изложены для других частей машины [110 – 114, 122].

Взаимное расположение в пространстве рабочих поверхностей машины производится с учетом множества геометрических параметров (рисунок 2.2). Так, размещение в пространстве центра ротора ( $x_{ЦР}$ ,  $y_{ЦР}$ ,  $z_{ЦР}$ ) и центра диска ( $x_{ЦД}$ ,  $y_{ЦД}$ ,  $z_{ЦД}$ ) производится, соответственно, по формулам:

$$x_{ЦР} = \frac{B_P}{2}; y_{ЦР} = y_M; z_{ЦР} = R_P - a_P; \quad (2.8)$$

$$x_{Ц} = \frac{B_D}{2} - L_D \cos \varphi_{УД}; y_{Ц} = y_M + L_{PD} - L_D \sin \varphi_{УД}; z_{ЦР} = R_D - a_D, \quad (2.9)$$

где  $B_P$  – расстояние между центрами роторов, м;

$y_M$  – текущая координата машины вдоль продольной оси, м;

$R_P$  и  $R_D$  – радиусы ротора и диска соответственно, м;

$a_P$  и  $a_D$  – требуемые заглубления ротора и диска соответственно, м;

$B_D$  – расстояние между шарнирами рычагов дисков, м;

$L_D$  – длина рычага крепления диска, м;

$\varphi_{УД}$  – угол установки диска к направлению движения, рад.

После взаимного размещения в пространстве рабочих поверхностей на каждом шаге интегрирования задается пространственное расположение машины в целом относительно неподвижной системы координат. Для большинства компьютерных экспериментов машина движется равномерно и прямолинейно вдоль оси ОУ, при этом игриковые координаты вершин треугольников рабочих поверхностей рассчитываются по формуле:

$$y_{ij} = y_{0ij} + v \cdot t, \quad (2.10)$$

где  $y_{0ij}$  – игриковая компонента вершины  $j$  треугольника  $i$  в начальный

момент времени, м;

$v$  – скорость движения машины, м/с;

$t$  – текущее время, с.

В начальный момент времени машина искусственно поднята над поверхностью для исключения появления высоких ускорений элементов грунта из-за мгновенно появившихся рабочих поверхностей. С началом моделирования машина постепенно заглубляется в почву. Для сохранения универсальности модели силы между элементами и рабочими поверхностями рассчитываются аналогично силам между элементами: в упруго-вязком приближении. Далее упругая сила рассчитывается исходя из  $r_{вн}$  по формуле, аналогичной (2.2).

С точки зрения математического анализа разработанная модель представляет собой систему множества дифференциальных уравнений второго порядка с существенно разрывными свободными слагаемыми. Для решения таких систем высокую эффективность имеет модифицированный метод Эйлера – Коши, который и был использован в данной работе [117, 120, 121, 135-137].

## 2.2.2 Компьютерная программа для вычислительных экспериментов

В качестве среды программирования использована Borland Delphi 7 (рисунок 2.4).

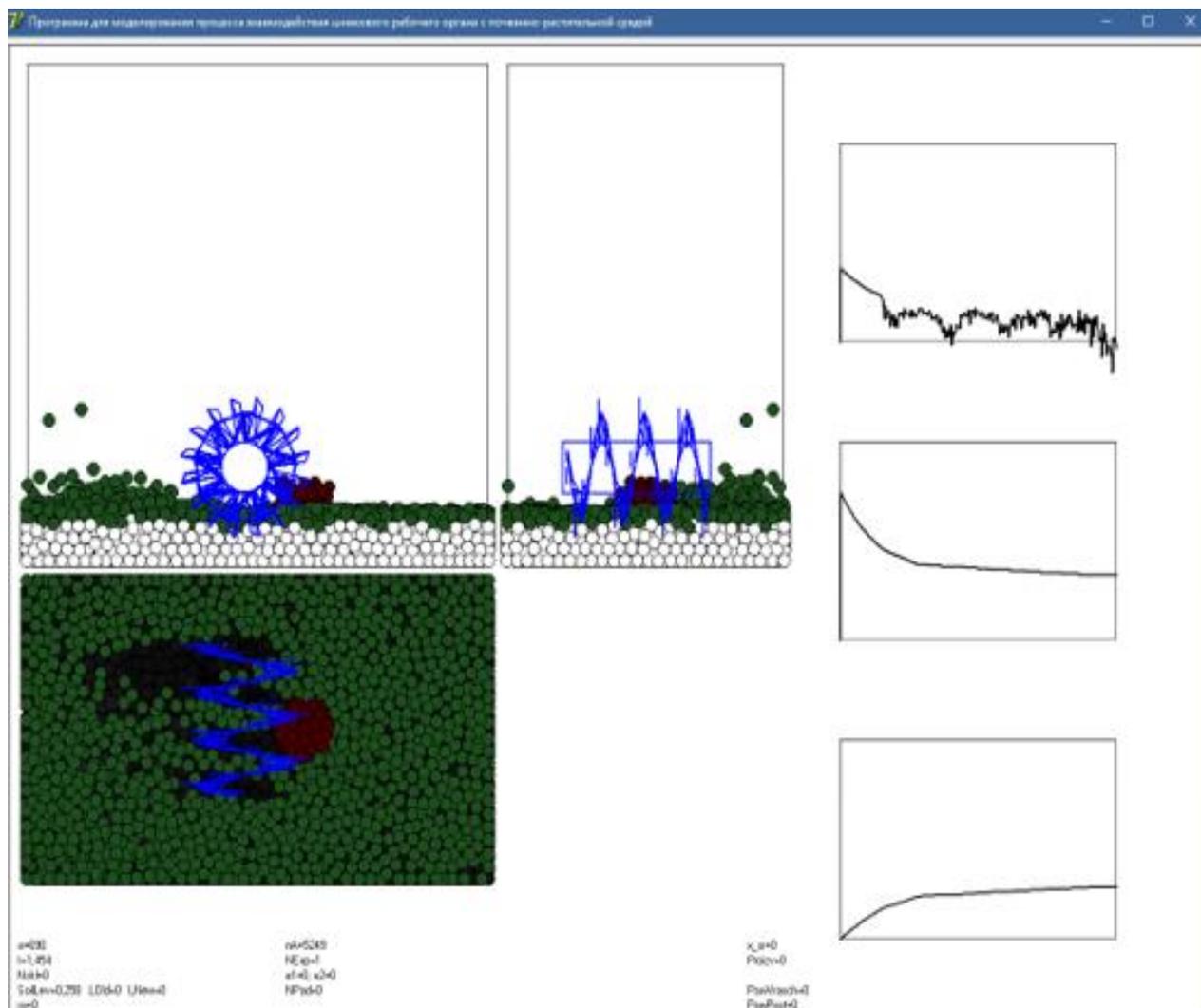


Рисунок 2.4 – Результаты работы лесопожарной грунтометательной машины в разработанной компьютерной программе

Для решения математической модели составлена компьютерная программа на языке Object Pascal (Свидетельство о регистрации № RU 2021663167, 12.08.2021).

### 2.2.3 Алгоритмическая реализация модели

Схема алгоритма моделирования лесопожарной грунтометательной машины со шнековым рабочим органом представлена на рисунке 2.5.

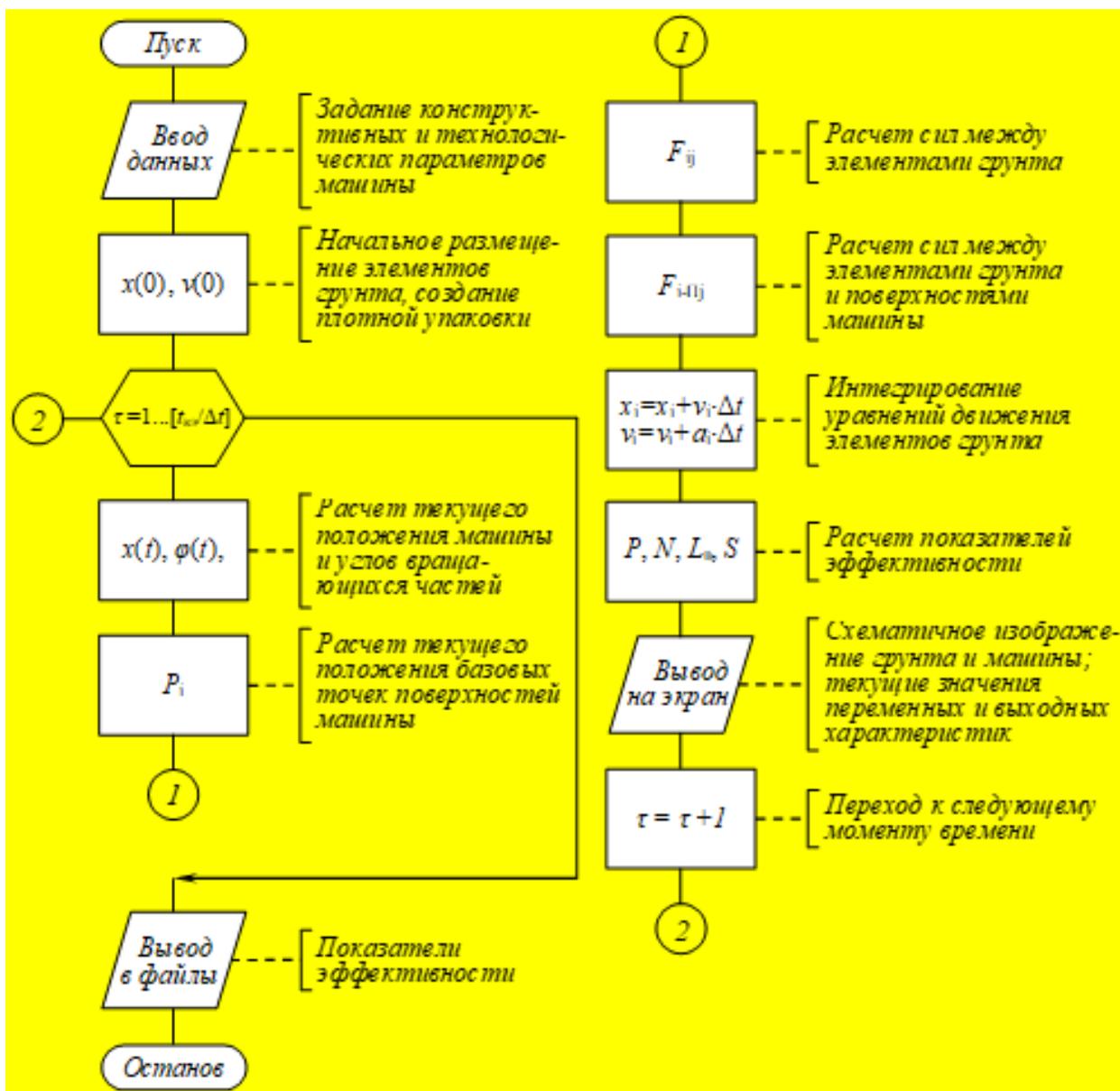
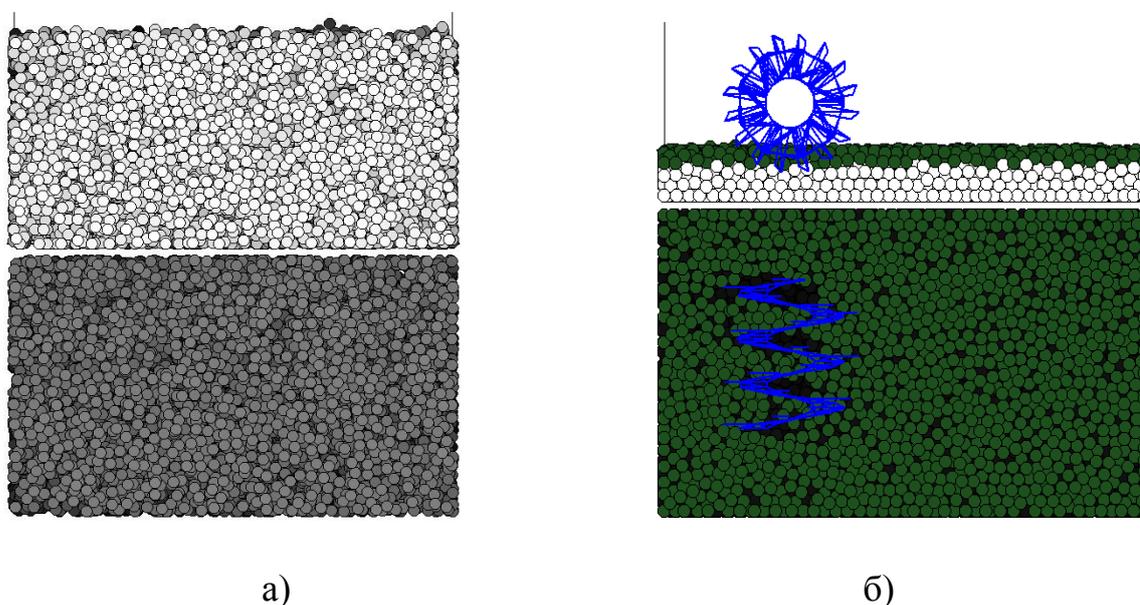


Рисунок 2.5 – Схема алгоритма моделирования ЛГП

## 2.2.4 Выявление зависимостей взаимодействия шнеков с почвогрунтом и препятствиями

### 2.2.4.1 Исследование процесса очистки лесной поверхности от лесной подстилки шнековыми рабочими органами без препятствий

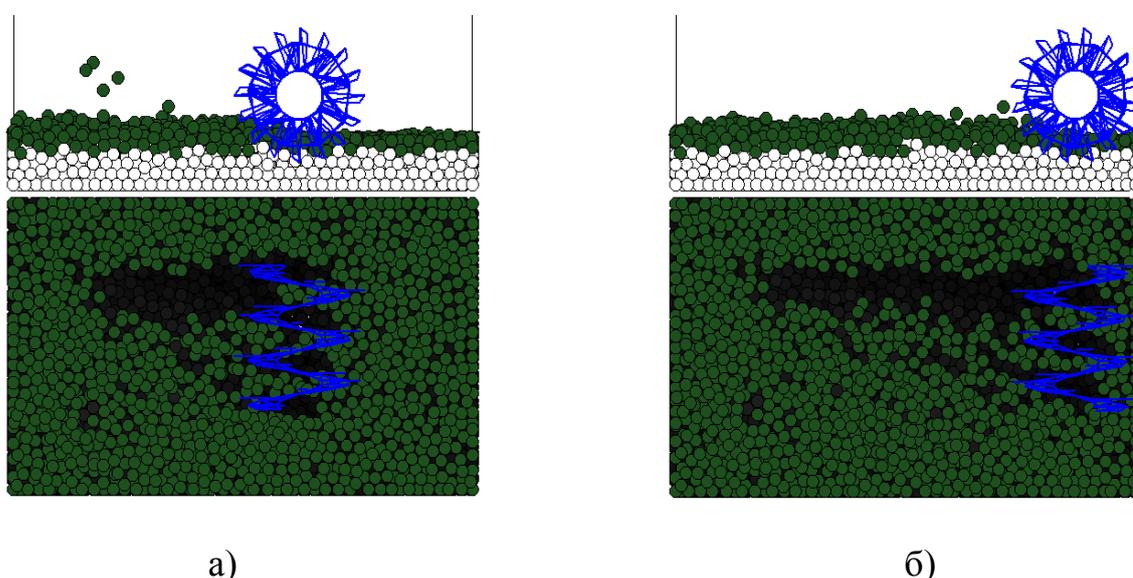
На рисунке 2.6 представлен фрагмент базового компьютерного эксперимента по очистке полосы от лесной подстилки от растительных остатков (вверху – проекция XZ, внизу – XY), а – начальное случайное размещение элементов; б – разделение элементов на почву и напочвенный покров. Сначала формируется необходимое количество элементов (около 8000) (рисунок 2.6, а). Затем срезается верхняя часть поверхности для выравнивания, при этом весь объем упаковки элементов разделяется на нижний слой почвы и верхний слой напочвенного покрова (рисунок 2.6, б).



*a* – начальное случайное размещение элементов; *б* – разделение элементов на почву и напочвенный покров

Рисунок 2.6 – Начальная стадия моделирования очистки поверхности почвы от растительных остатков (вверху – проекция XZ, внизу – XY)

Шнековый рабочий орган помещался в левой части пространства моделирования. Затем при поступательном и вращательном движении шнекового барабана, снабженного рыхлящими зубьями, напочвенный покров разрыхляется и смещается винтовой поверхностью шнека в боковом направлении (рисунок 2.7, а). Когда шнековый рабочий орган достигал правой границы пространства моделирования компьютерный эксперимент останавливали (рисунок 2.7, б). После этого производился расчет показателей эффективности: полноту очистки и потребляемую мощность.

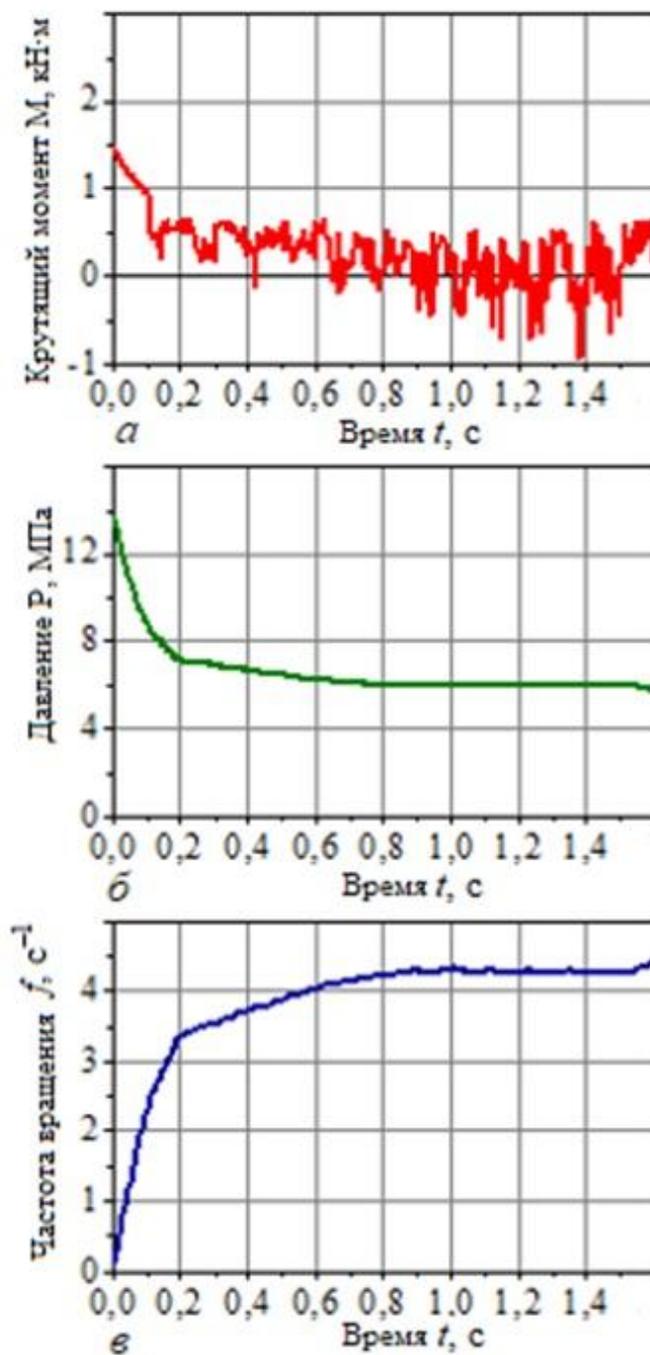


*а* – начало очистки полосы; *б* – конец очистки полосы

Рисунок 2.7 – Моделирование очистки поверхности почвы без пней

Зависимости параметров гидропривода шнекового барабана от времени представлены на рисунке 2.8, при движении без препятствий.

В процессе разгона шнека крутящий момент гидромотора снижается от 1,5 кНм до среднего нулевого значения за время 1 с, однако амплитуда колебания составляют от 0,5 до -0,5 кНм (рисунок 2.8, а). Снижение давления в гидромоторе происходит по экспоненциальному закону в диапазоне от 13 МПа до 4 МПа (рисунок 2.8, б), а частота вращения рабочего органа увеличивается также приблизительно по экспоненциальному закону до более 4 оборотов в секунду (рисунок 2.8, в).



а) – крутящий момент в гидромоторе (M); б) – давление в гидромоторе (P); в) – частота вращения шнекового барабана (f)

Рисунок 2.8 – Зависимости от времени динамических и кинематического параметров гидромотора привода шнеков

Таким образом, с помощью имитационной модели установлены кинематические и динамические характеристики гидропривода шнекового рабочего

органа в процессе очистки полосы, а также получить на основе динамики частиц характеристики напочвенного покрова [118, 119, 124, 157, 161].

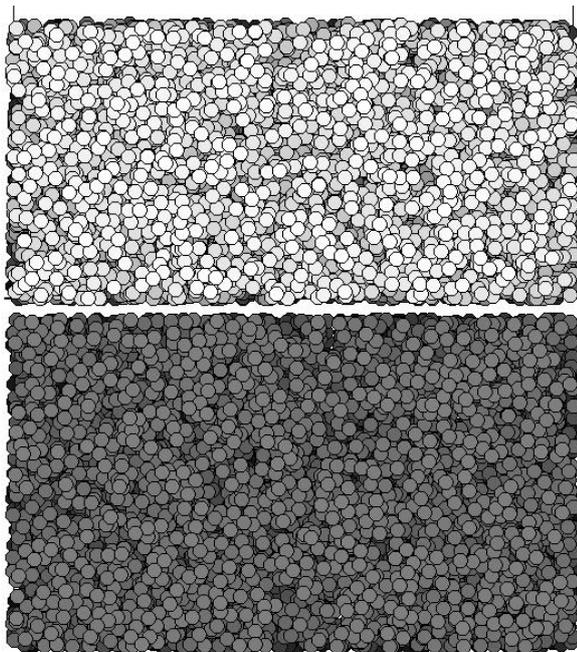
#### 2.2.4.2 Исследование взаимодействия шнекового рабочего органа с препятствием в виде пня

Одной из важных проблем при конструировании лесопожарной грунтометательной машины является защита ее рабочих органов при контакте с препятствиями, встречающимися на лесных объектах, в частности, пнями. Для изучения процесса взаимодействия шнекового рабочего органа с пнем в разработанную модель добавлен цилиндрический объект, состоящий также из шарообразных элементов (рисунок 2.9). Для изучения процесса взаимодействия шнекового рабочего органа с пнем в разработанную модель добавлен цилиндрический объект, состоящий также из шарообразных элементов. Каждая из рассматриваемых сред – почва, напочвенный покров, пень – характеризовалась своим набором физических параметров (плотность, коэффициенты жесткости, вязкого трения, ограничения взаимодействия) [47, 48, 158].

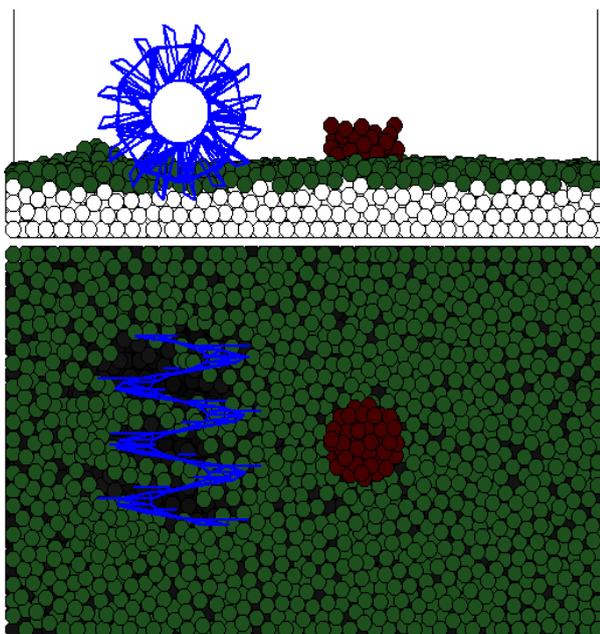
В начальный момент времени компьютерного эксперимента начиналась подготовка плотноупакованной среды (рисунок 2.9, *а*) аналогично описанному выше.

После этого шнековый барабан помещался на расстоянии более 0,5 м от пня для того, чтобы успел при поступательном движении раскрутиться перед контактом с пнем (рисунок 2.9, *б*).

Этапы преодоления шнековым рабочим органом препятствия в виде пня (вверху – проекция XZ, внизу – XY) представлены на рисунке 2.10.



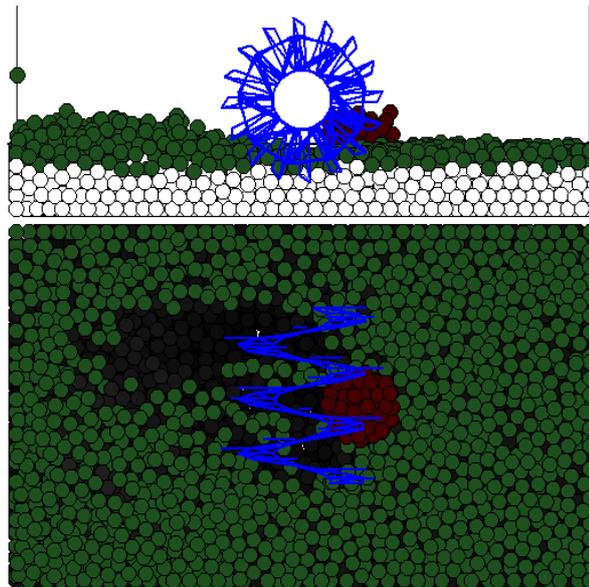
a)



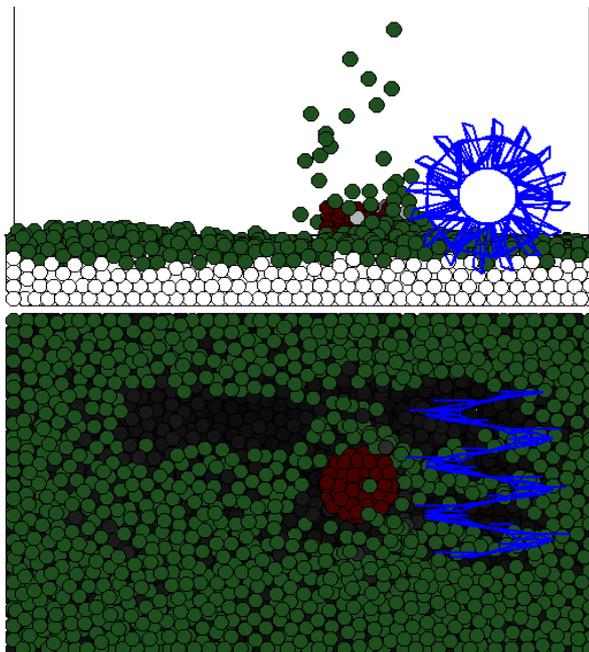
б)

*a* – размещение элементов лесной почвы до уплотнения и после; *б* – размещение шнекового рабочего органа и пня

Рисунок 2.9 – Размещение элементов лесной почвы, шнекового рабочего органа и пня



а)



б)

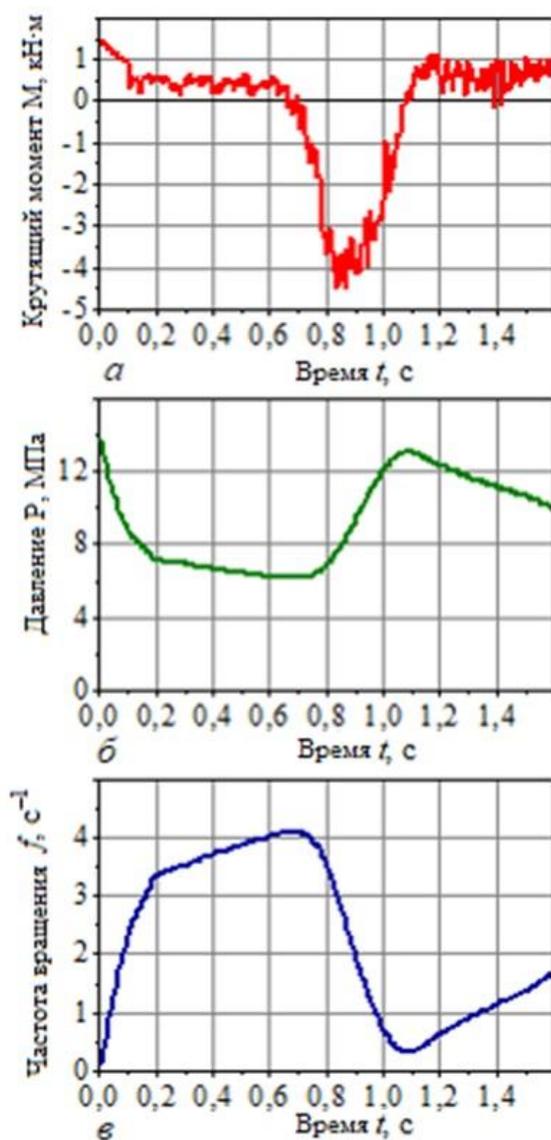
*a* – начальная стадия взаимодействия шнека с пнем; *б* – продолжение очистки почвы после взаимодействия с пнем

Рисунок 2.10 – Этапы преодоления шнековым рабочим органом препятствия в виде пня (вверху – проекция XZ, внизу – XY)

По мере раскрутки и движения к пню шнековый барабан очищал полосу обработки (рисунок 2.10, *a*). После окончания взаимодействия с пнем рабочий

орган снова раскручивался до установившегося режима работы (рисунок 2.10, б).

На рисунке 2.11 представлены зависимости от времени параметров гидропривода шнекового барабана при преодолении препятствий.



а) – крутящий момент в гидромоторе ( $m$ ); б) – давление в гидромоторе ( $P$ ); в) – частота вращения шнекового барабана ( $f$ )

Рисунок 2.11 – Зависимости от времени параметров гидропривода шнекового барабана при преодолении препятствий

При преодолении рабочим органом пня в гидроприводе возникал отрицательный тормозящий момент величиной около 4 кНм (рисунок 2.11, а), при

этом частота вращения шнекового барабана снижалась от  $4 \text{ с}^{-1}$  до нуля (рисунок 2.11, в), а затем повышалось давление в гидромоторе и шнек начинает опять увеличивать частоту вращения после преодоления препятствия (рисунок 2.11, б).

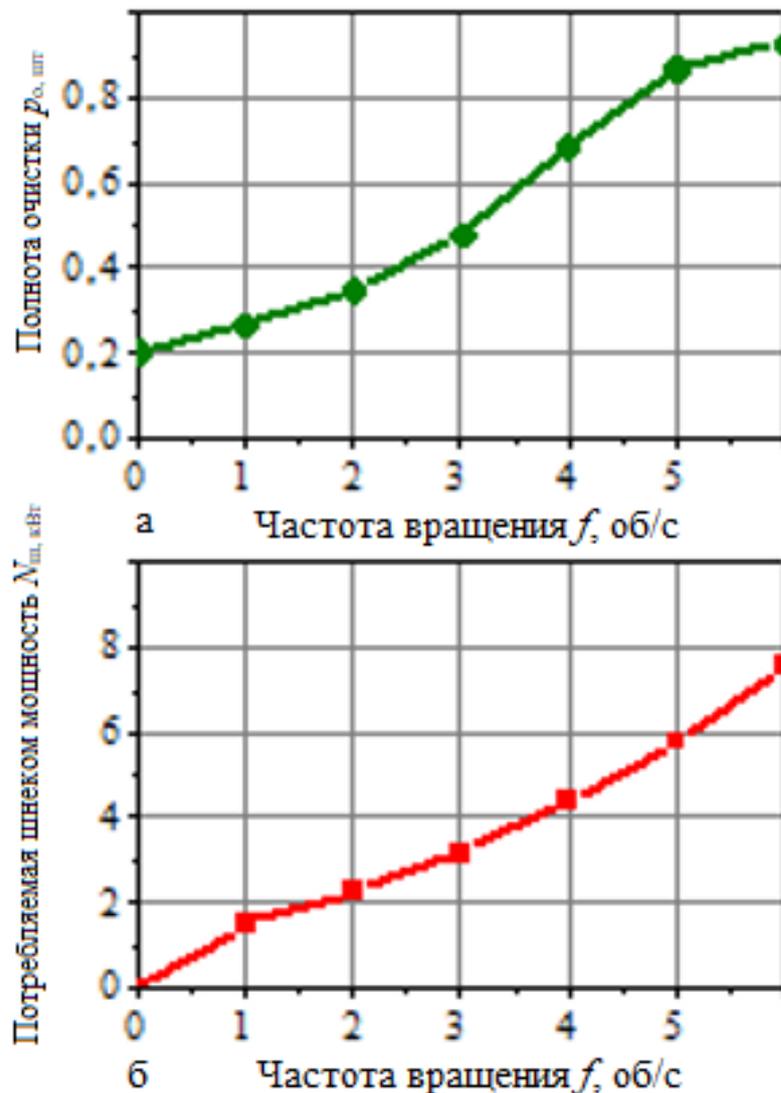
Таким образом, имитационная модель позволяет дать оценку влияния процесса взаимодействия шнекового рабочего органа с препятствием в виде пня на кинематические и динамические характеристики гидропривода [105, 106, 125, 126, 132].

#### 2.2.4.3 Зависимости показателей эффективности рабочего процесса ЛГП от частоты вращения шнека

Для изучения влияния частоты вращения шнекового барабана на показатели эффективности рабочего процесса была проведена серия компьютерных экспериментов, в которых частоту вращения  $f$  изменяли от 0 до 6 об/с, при этом принимался шаг равный 1 об/с. К показателям эффективности рабочего процесса шнековым рабочим органом относятся:  $p_o$  – полнота очистки полосы обработки от напочвенного покрова и  $N_{ш}$  – потребляемая мощность шнековым рабочим органом. Полнота очистки противопожарной полосы от напочвенного покрова определялась как отношение удаленного объема  $V_0$  напочвенного покрова к первоначальному  $V_{п}$ .

Как видно из рисунка 2.12, (а) зависимость полноты очистки полосы  $p_o$  от частоты вращения рабочего органа  $f$  плавно возрастает и имеет вид сигмоидальной функции. При увеличении частоты вращения в диапазоне 0 ... 3 об/с потребляемая шнеком мощности  $N_{ш}$  составляет около 3 кВт. При частоте вращения более 5 об/с потребляемой шнеком мощность возрастает до 8 кВт  $N_{ш}$ .

Как видно из рисунка 2.12, (б) зависимость потребляемой шнеком мощности  $N_{ш}$  от частоты вращения рабочего органа  $f$  имеет вид квадратичной функции [159].



$a$  – полнота очистки ( $p_o$ )  $V_0/V_{п}$ ;  $b$ ) – потребляемая шнеком мощность ( $N_{ш}$ )

Рисунок 2.12 – Зависимости показателей эффективности рабочего процесса ЛГП от частоты вращения  $f$  шнекового барабана

#### 2.2.4.4 Зависимости показателей эффективности рабочего процесса ЛГП от толщины слоя лесной подстилки

На лесных объектах различных типов толщина слоя лесной подстилки (напочвенного покрова) может варьировать в диапазоне 5...30 см. Поэтому предлагаемая конструкция шнекового рабочего органа с рыхлящими зубьями должна эффективно работать в условиях различных толщин напочвенного покрова. Для проверки влияния толщины слоя лесной подстилки на

эффективность рабочего процесса шнекового барабана с рыхлящими зубьями нами проведена серия компьютерных экспериментов с изменениями толщины напочвенного покрова от 0 до 30 см с шагом 5 см (рисунок 2.13).

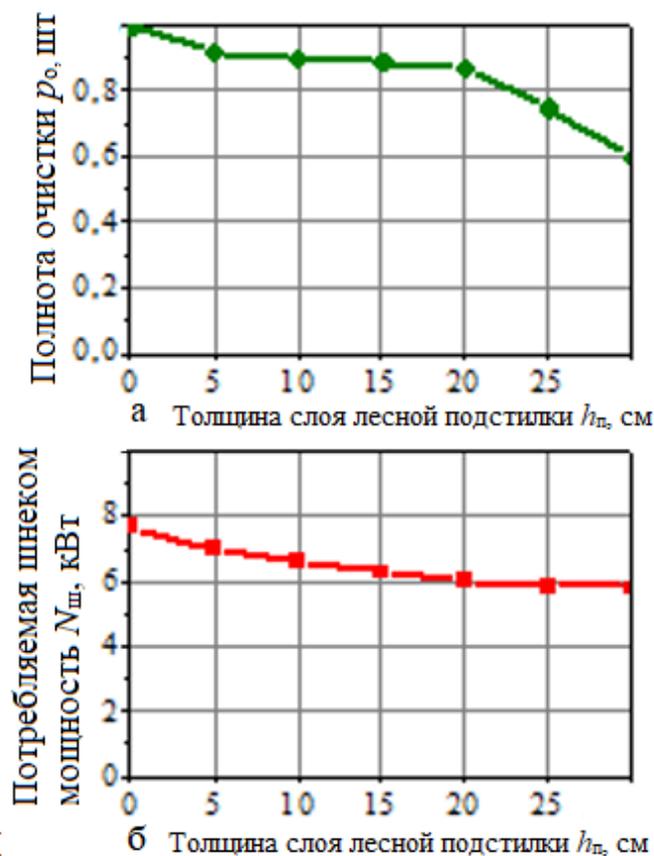


Рисунок 2.13 – Влияние толщины слоя лесной подстилки  $h_{л}$  на полноту очистки поверхности грунта от лесной подстилки  $p_0$  (а) и потребляемую шнеком мощность  $N_{ш}$  (б)

Как следует из рисунка 2.13, (а) шнековый рабочий орган с рыхлящими зубьями при толщине напочвенного покрова до 20 см обеспечивает полноту очистки полосы от напочвенного покрова не менее 0,86, а затем при толщине напочвенного покрова 30 см снижается до 0,6. Как следует из рисунка 2.13, (б) при увеличении толщины напочвенного покрова до 30 см потребляемая мощность шнековым рабочим органом с рыхлящими зубьями снижается от 8 кВт до 6 кВт из-за снижения полноты очистки полосы от напочвенного покрова.

Таким образом, шнековый рабочий орган с рыхлящими зубьями при толщине напочвенного покрова до 20 см обеспечивает полноту очистки полосы от напочвенного покрова не менее 0,86, при этом потребляемая мощность находится в диапазоне 6...8 кВт.

## 2.3 Теоретическая оптимизация параметров шнекового барабана

### 2.3.1 Двухфакторная оптимизация геометрических параметров шнекового барабана

Наиболее важными конструктивными параметрами шнекового барабана являются высота винтовой спирали  $h$  и шаг спирали  $s$ . В этом случае можно поставить задачу двухфакторной оптимизации геометрических параметров шнекового барабана. Аналитически данную задачу оптимизации можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} p_n(h, s) \rightarrow \min; \\ P(h, s) \rightarrow \max; \Rightarrow h^{onm}, s^{onm}. \\ N(h, s) \rightarrow \min; \end{cases}$$

Для обеспечения условия сплошности сдвига напочвенного покрова частота вращения шнекового барабана  $\omega_B$  изменялась обратно пропорционально шагу спирали и составляла 7,2 об/с для  $s = 16$  см, 3,5 об/с для  $s = 33$  см, 1,8 об/с для  $s = 66$  см [133, 134, 138, 139].

В результате аппроксимации получены следующие аналитические формулы:

$$p_n(h, s) = 0,667h^2 + 5,767 \cdot 10^{-4}s^2 - 0,040h \cdot s - 13,75h + 0,531s + 74,75; \quad (2.11)$$

$$P(h, s) = -0,115h^2 - 0,018s^2 - 3,676 \cdot 10^{-3}h \cdot s + 3,496h + 1,287s - 0,473; \quad (2.12)$$

$$N(h, s) = 0,083h^2 + 8,074 \cdot 10^{-3}s^2 + 2,941 \cdot 10^{-3}h \cdot s - 0,064h - 0,539s + 14,03; \quad (2.13)$$

где  $h$  – глубина нарезки винта, см;  
 $s$  – шаг винта шнека, см;  
 $p_{\text{п}}$  – доля напочвенного покрова в потоке грунта, %;  
 $P$  – производительность шнека, кг/с;  
 $N$  – потребляемая мощность, кВт.

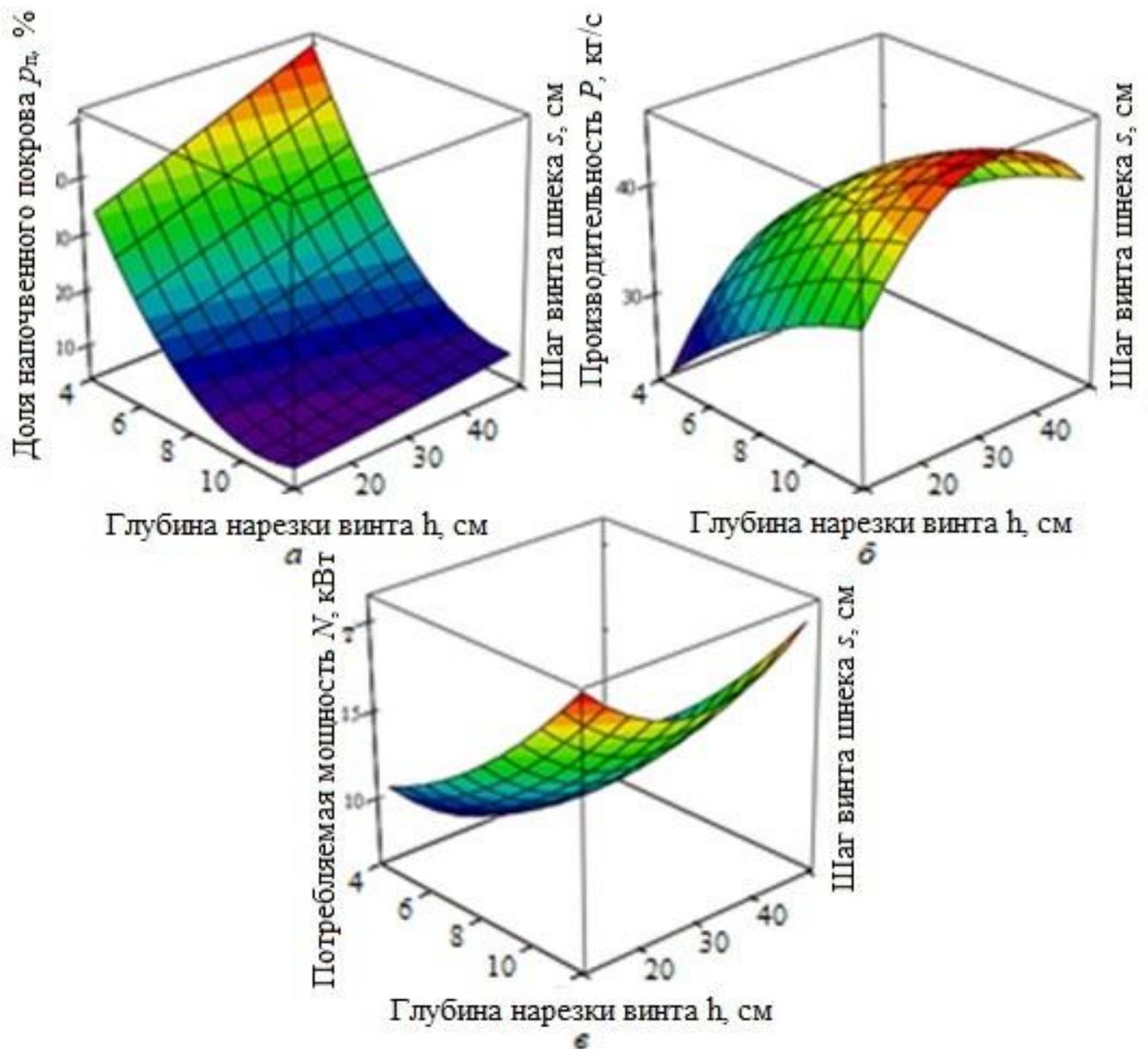
Согласно аналитическим формулам (2.11 – 2.13) построены графики влияния глубины нарезки  $h$  и шага винта  $s$  шнекового барабана грунтомета – полосопрокладывателя на показатели эффективности его рабочего процесса (рисунок 2.14).

Показателями эффективности рабочего процесса являются:  $p_{\text{п}}$  – доля напочвенного покрова в потоке грунта, %;  $P$  – производительность шнека, кг/с;  $N$  – потребляемая мощность, кВт.

Как видно из рисунка 2.14 (а) при увеличении глубины нарезки винтовой спирали от 4 см до 12 см, доля удаления напочвенного покрова в потоке грунта увеличивается от 5% до 35%. Как видно из рисунка 2.14 (б) увеличение глубины нарезки в диапазоне от 4,1 см до 12,1 см, происходит увеличение производительности от 0 кг/с до 46 кг/с. Также на рисунке отображено 2.14 (в) повышение глубины нарезки от 4,1 см до 12,1 см, расходуемая мощность при этом возрастает от 11 кВт до 16 кВт.

Как следует из рисунка 2.15, г можно выбрать следующие оптимальные параметры шнекового рабочего органа: глубина нарезки винтовой ленты в диапазоне 7,5 ... 8,7 см, шаг винтовой ленты в диапазоне 23 ... 40 см.

Таким образом, на основе математической модели ЛГП исследовано влияние основных параметров шнекового барабана на эффективность очистки рабочей полосы от напочвенного покрова и эффективность метания грунта.



$a - (p_n)$  доля напочвенного покрова в потоке грунта;  $б - (P)$  производительность;  $в - (N)$  – потребляемая мощность

Рисунок 2.14 – Графики влияния глубины нарезки  $h$  и шага винта  $s$  шнекового барабана на показатели эффективности рабочего процесса грунтомета – полосопрокладывателя

Как следует из рисунка 2.15,  $г$  можно выбрать следующие оптимальные параметры шнека: глубина нарезки 7,5 ... 8,7 см, шаг винта 23 ... 40 см.

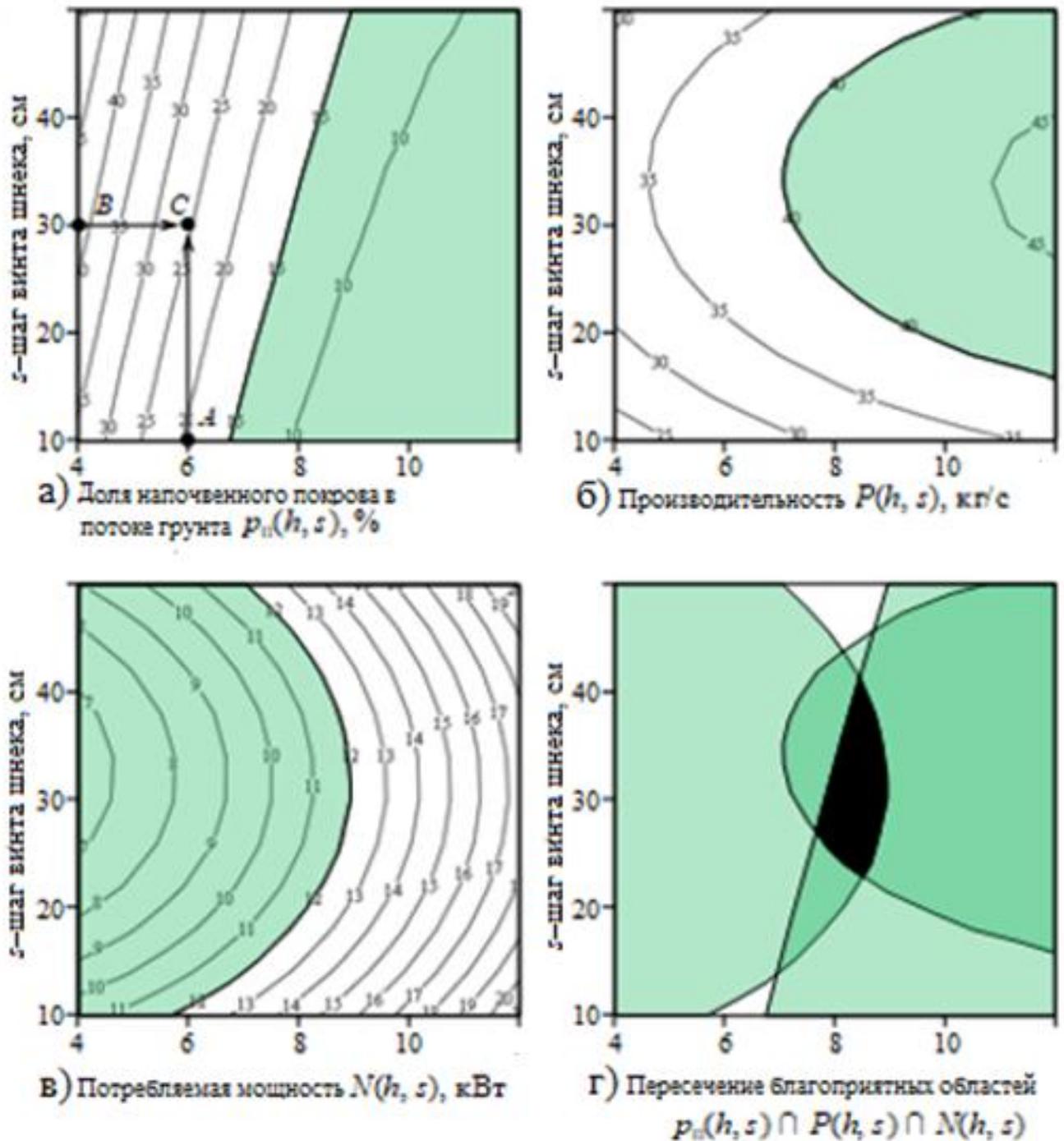


Рисунок 2.15 – Картограммы оптимизации геометрических параметров шнекового барабана грунтометательной машины

Таким образом, на основе математической модели лесопожарной грунтометательной машины исследовано влияние основных параметров шнекового барабана на эффективность очистки рабочей полосы от напочвенного покрова и эффективность метания грунта.

### 2.3.2 Оптимизация параметров рыхлящих зубьев шнекового барабана

Наиболее важными параметрами зубьев шнекового барабана являются количество ножей  $N_n$  и длина выступа ножа  $h_n$  от шнековой спирали в направлении, перпендикулярном оси барабана. Исследовалось одновременное влияния параметров  $N_n$  и  $h_n$  на показатели эффективности машины.

Математически задачу двухфакторной оптимизации параметров зубьев шнекового рабочего органа можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} p_0(N_n, h_n) \rightarrow \max; \\ N_{ш}(N_n, h_n) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow N_n^{opt}, h_n^{opt}. \quad (2.14)$$

В результате аппроксимации получены следующие аналитические формулы для показателей эффективности грунтометательной машины:

$$p_0(N_n, h_n) = 1,302 \cdot 10^{-4} N_n^2 - 6,167 \cdot 10^{-4} h_n^2 - 1,875 \cdot 10^{-4} N_n \cdot h_n + 7,812 \cdot 10^{-3} N_n + 0,025 h_n + 0,529, \quad (2.15)$$

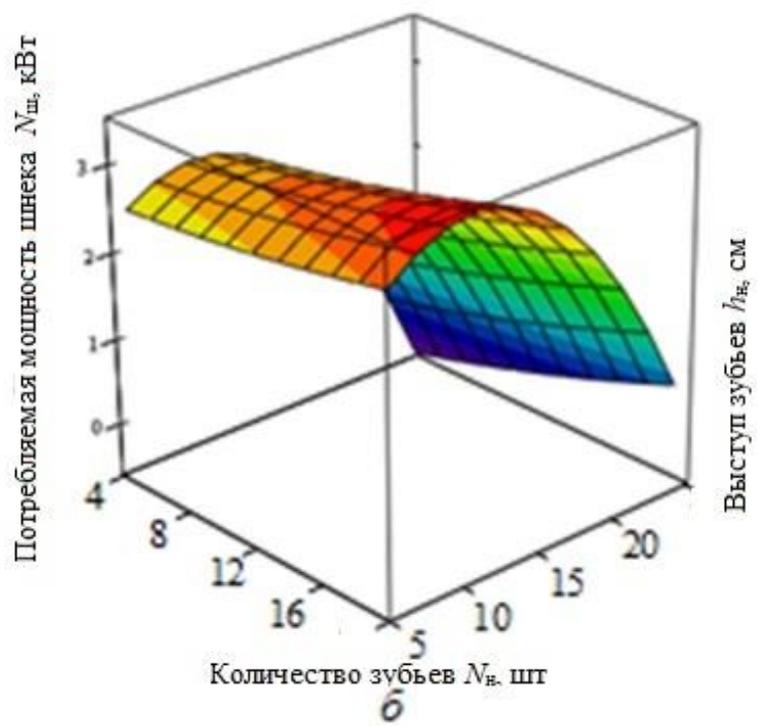
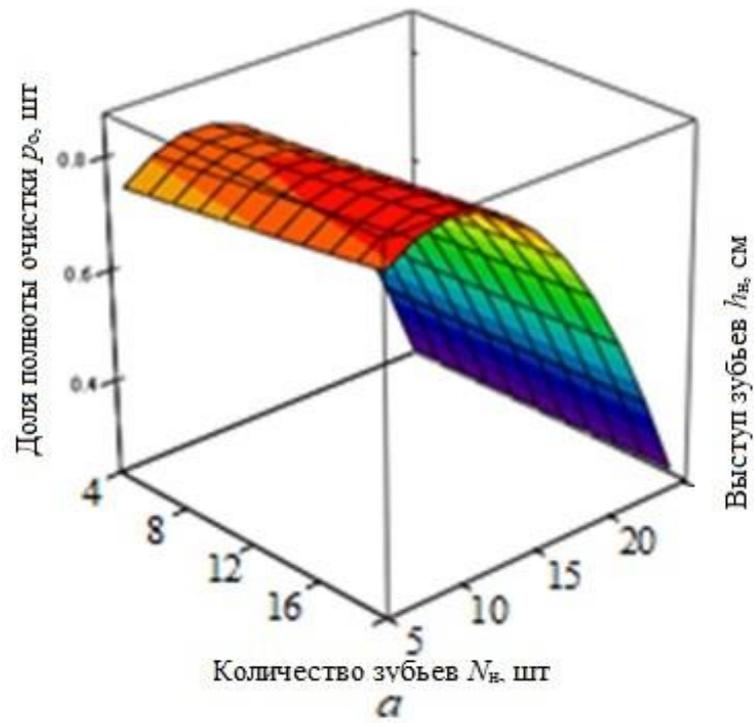
$$N_{ш}(N_n, h_n) = 3,906 \cdot 10^{-3} N_n^2 - 3,500 \cdot 10^{-3} h_n^2 + 1,875 \cdot 10^{-3} N_n \cdot h_n - 0,024 N_n + 0,128 h_n + 1,529, \quad (2.16)$$

где  $N_n$  – количество зубьев, шт;

$h_n$  – выступ зубьев, см;

Как следует из картограммы оптимизации параметров зубьев шнекового барабана грунтометательной машины (рисунок 2.17, з) оптимальное количество рыхлящих зубьев составляет 12, оптимальная величина выступа зубьев составляет 11 см. При этом полнота очистки полосы обработки составит более 80% потребляемая мощность составит менее 12 кВт.

Таким образом, на основе имитационной модели лесопожарной грунтометательной машины со шнековым рабочим органом исследовано влияние основных параметров ножей рабочего органа на эффективность очистки рабочей полосы от напочвенного покрова.



$a$  – доля полноты очистки полосы ( $p_0$ );  $b$  – потребляемая мощность ( $N_{ш}$ )

Рисунок 2.16 – Графики влияния количества ножей  $N_n$  и длины зубьев шнекового барабана  $h_n$

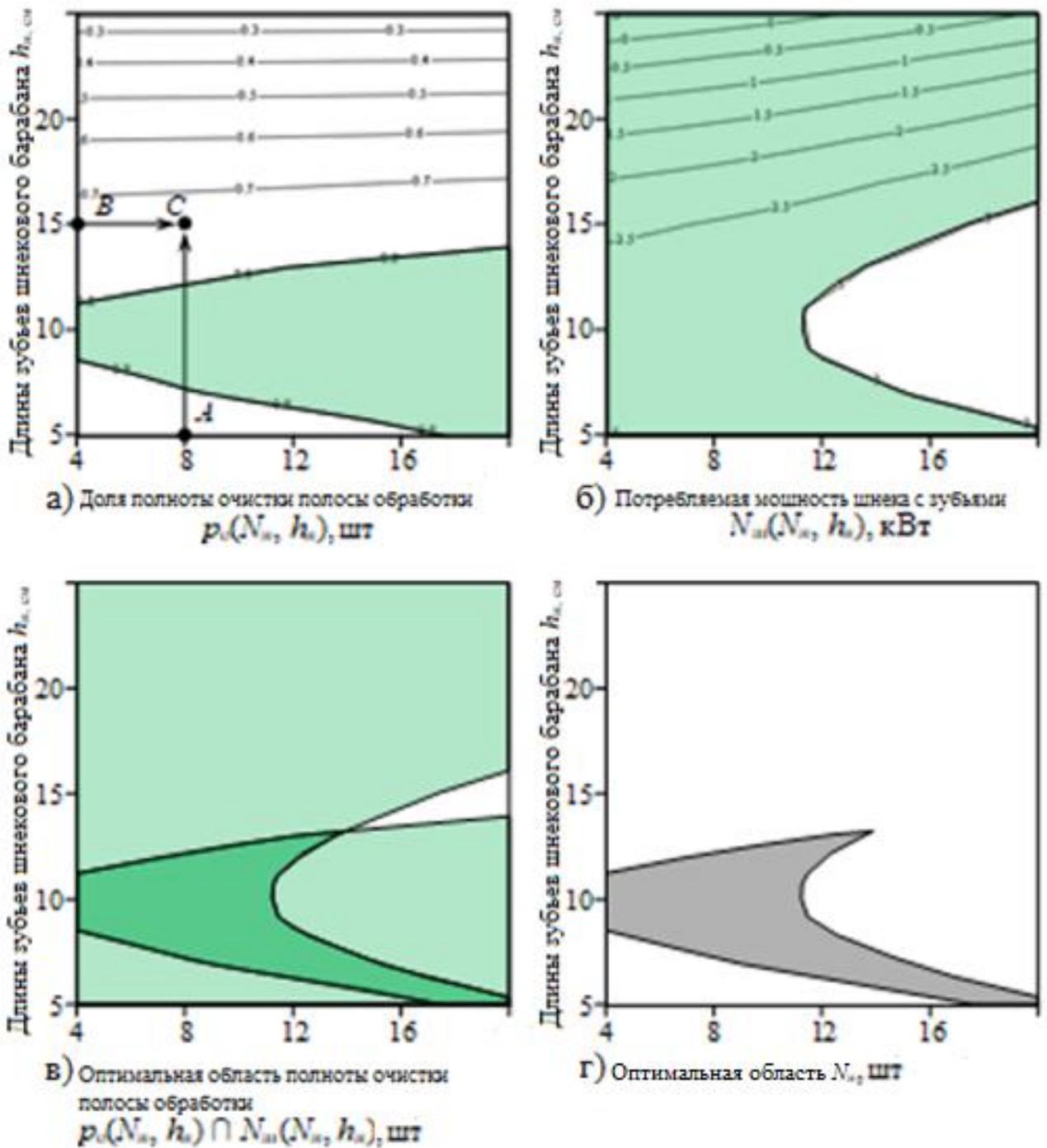


Рисунок 2.17 – Картограммы оптимизации параметров зубьев шнекового барабана грунтометательной машины

Оптимальная частота вращения рабочего органа составляет около 5 об/с. При этом достигается полнота очистки более 0,89, а потребляемая рабочим органом мощность не превышает 6 кВт.

## 2.4 Исследование кинематики и динамики шнекового рабочего органа на виртуальном стенде

### 2.4.1 Разработка виртуального стенда

Стенд включает: основание 1, направляющая 2, водило 3, обозначение земли 4, динамометрический блок 5, модульное орудие 6, пень 7 (Рисунок 2.18). Водило 3 может перемещаться по направляющей 2 без трения. На водило 3 жестко установлен виртуальный динамометрический блок 5, на котором закреплен шнековый рабочий орган 6.

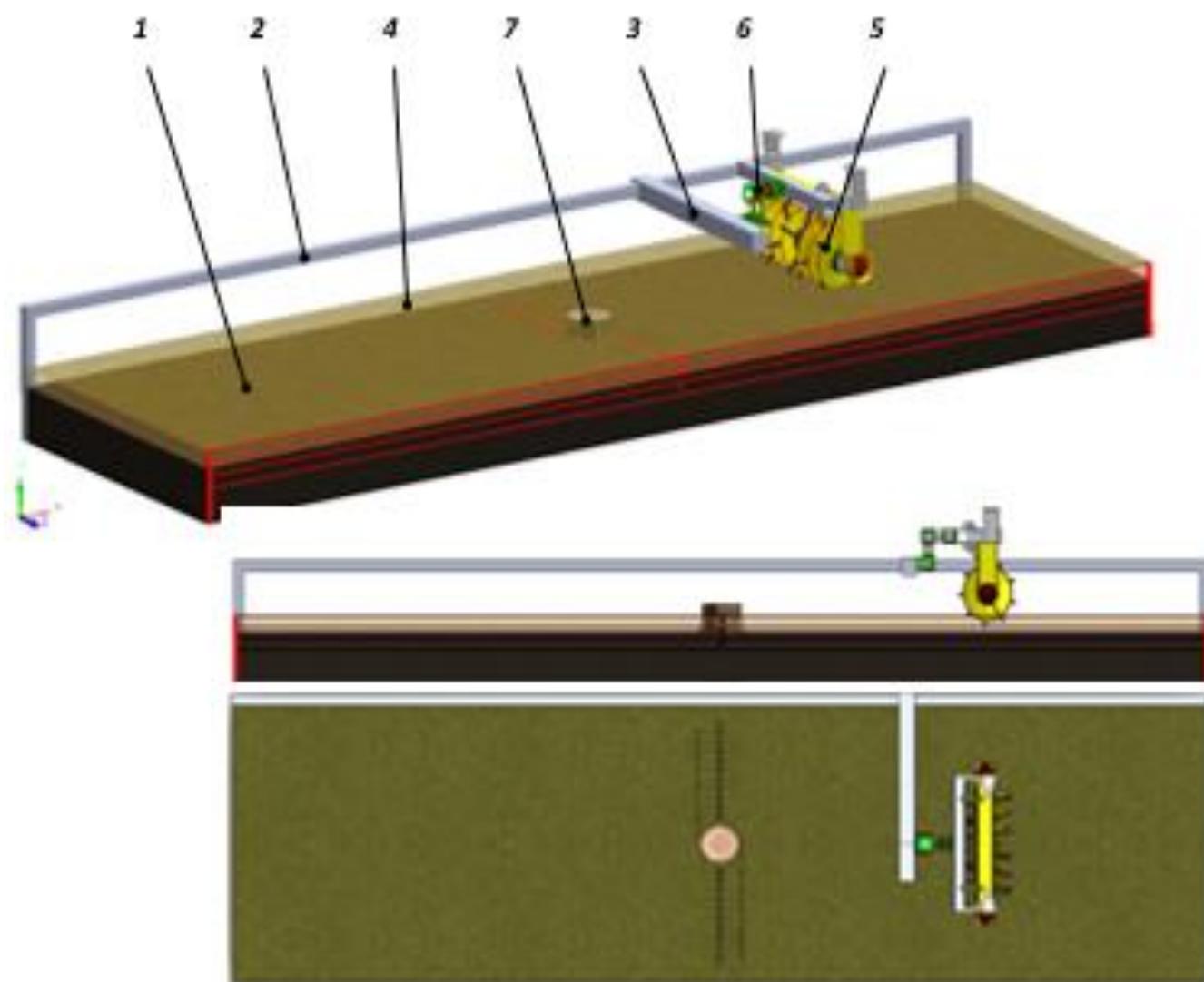


Рисунок 2.18 – Стенд для виртуальных исследований шнекового рабочего органа с рыхлящими зубьями

Виртуальный динамометрический блок (рисунок 2.19) для перемещения рабочего органа в направлении силы  $R_y$  имеет направляющую 1, по которой перемещается каретка 2. Для перемещения рабочего органа в направлении  $R_z$  блок снабжен направляющей 3, по которой перемещается каретка 4. Для перемещения рабочего органа в направлении  $R_x$  блок снабжен направляющей 5, по которой перемещается каретка 6.

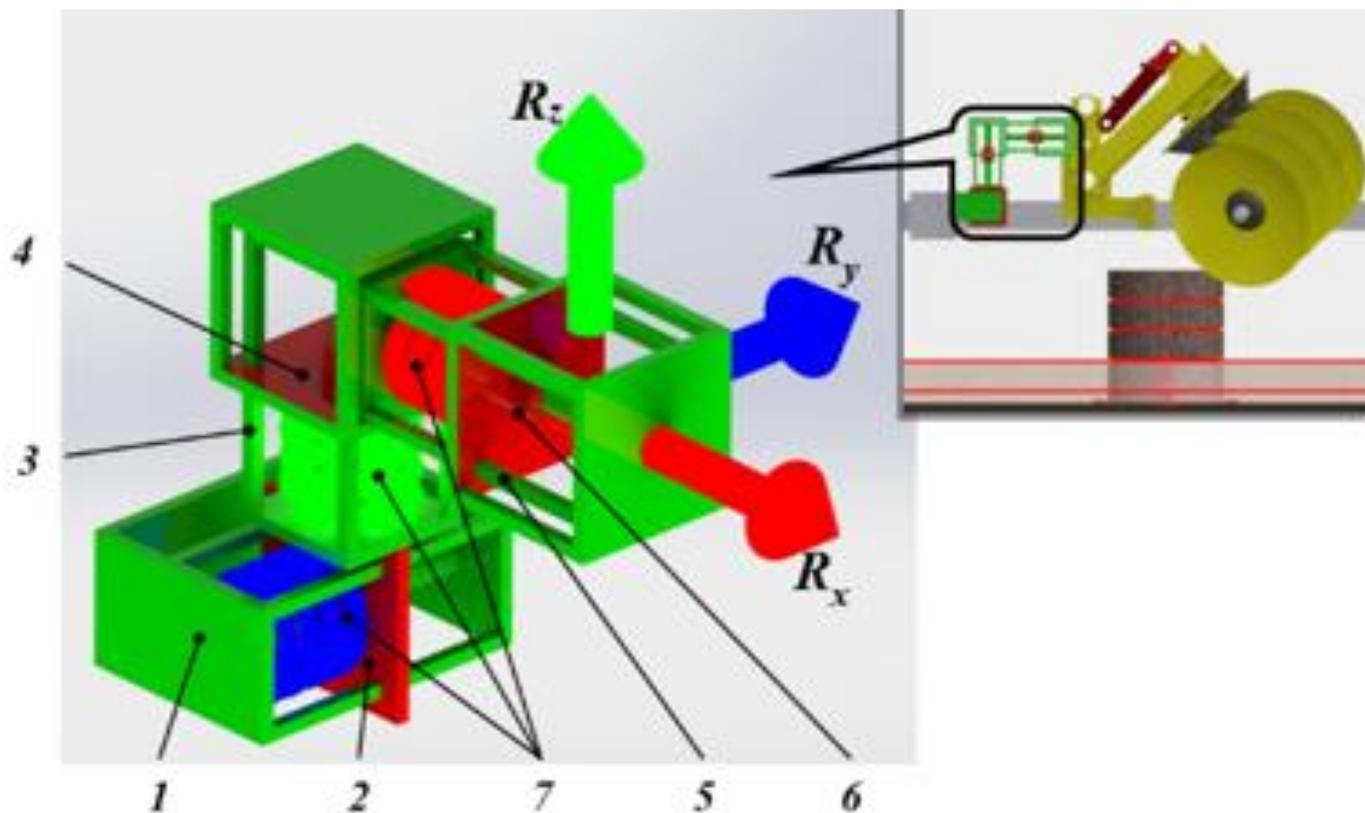


Рисунок 2.19 – Виртуальный тензометрический блок

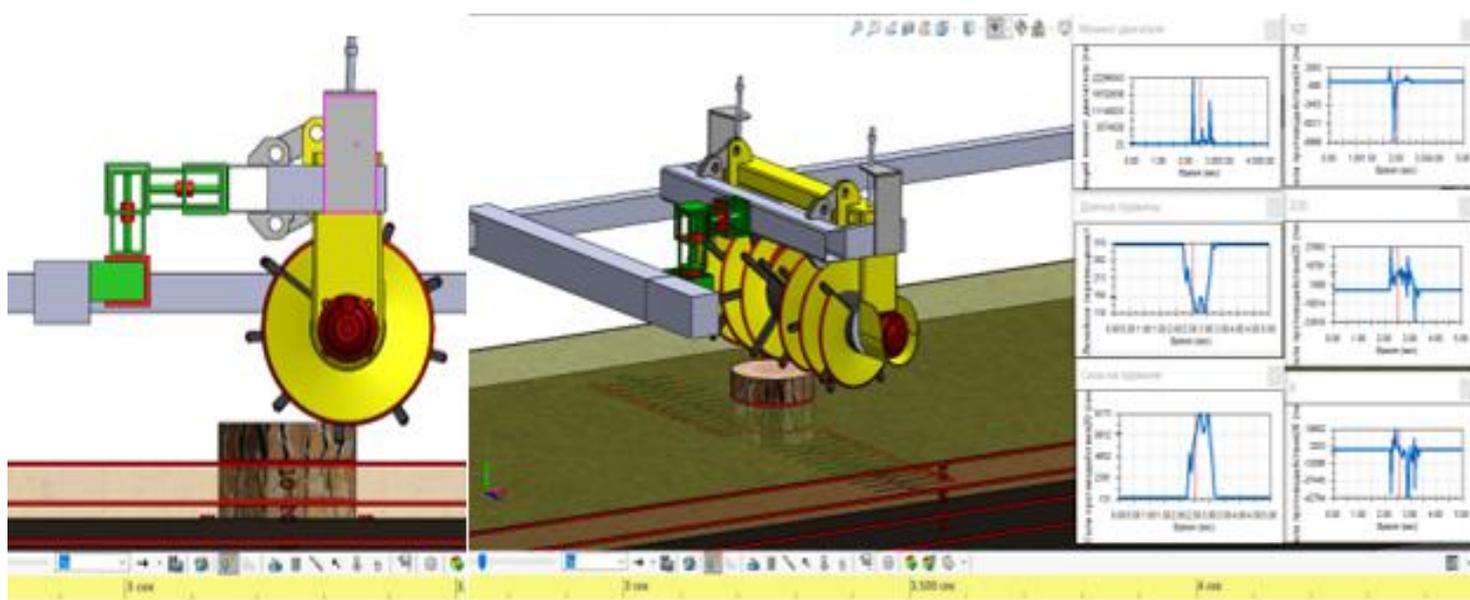
Динамометрический блок при испытаниях твердо присоединяется к направляющей блока (позиция 1) с водилом и кареткой (позиция 6), а также со шнековым рабочим органом. В конструкции присутствуют жесткие соединения между кареткой (позиция 2) и направляющей (позиция 3), а также соединены друг с другом каретка (позиция 4) и направляющая (позиция 5).

В следствии чего, ШРО (позиция 6) может свободно при испытаниях на виртуальном стенде выполнять перемещения в трех плоскостях ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) в отличие от начального неподвижного звена (позиция 1), при этом подвижность

рабочего органа ограничивается виртуальными пружинами с предварительно задаваемой жесткостью.

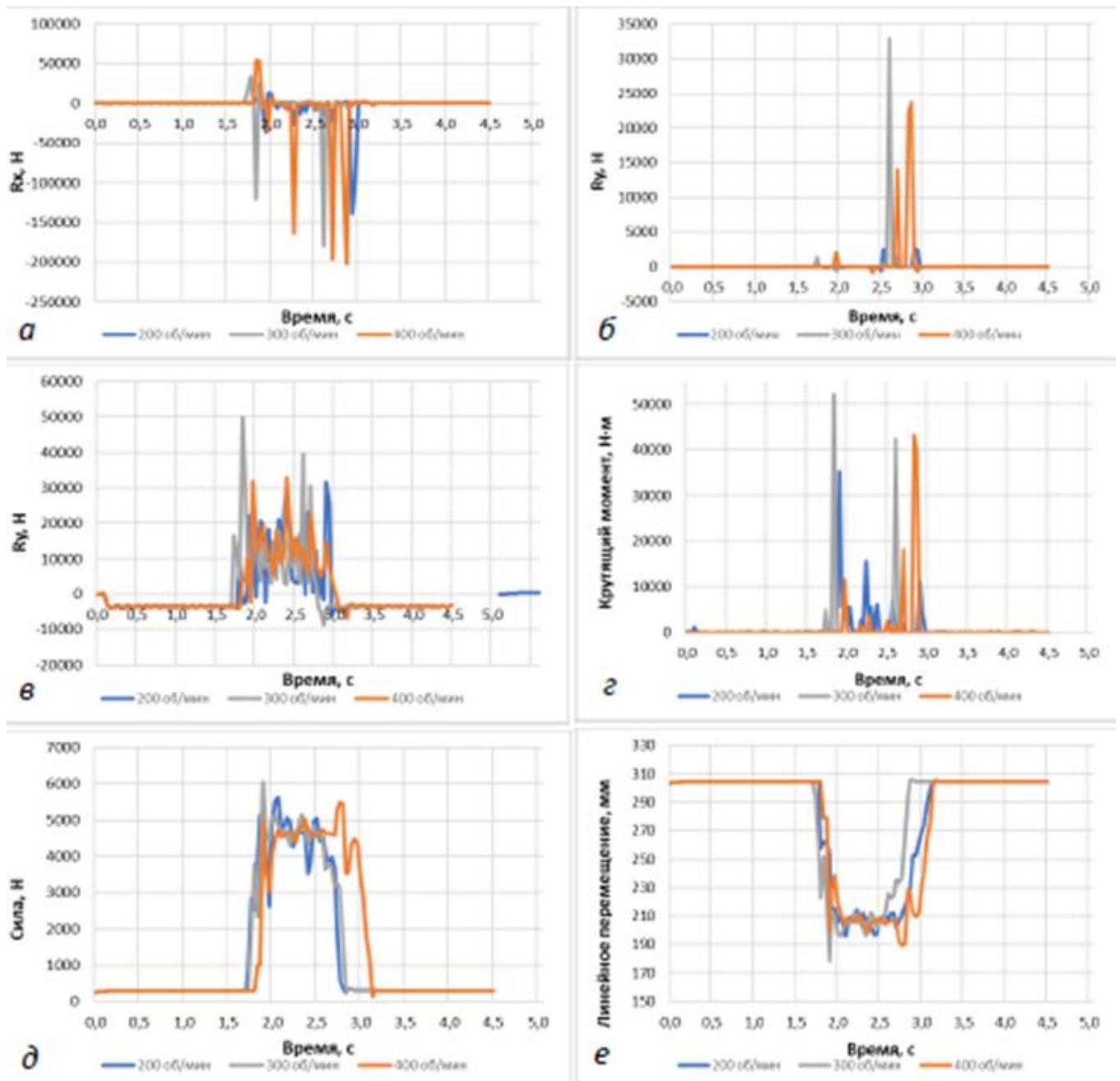
Данные полученные в ходе эксперимента ШРО могут анализироваться непосредственно в режиме реально времени внутри приложения и также могут передаваться в сторонние программы для окончательной обработки в процессе испытаний ШРО при помощи виртуального испытательного стенда, который помогает выявлять основные параметры.

В ходе эксперимента моделирования (рисунок 2.20) отслеживались ключевые параметры: крутящий момент на валу гидромотора; длина пружины предохранительного механизма шнека; сила на пружине; тяговая сила  $R_x$ ; поперечная сила сдвига подстилки в сторону  $R_y$ ; вертикальная сила  $R_z$ .



#### 2.4.2 Анализ результатов виртуальных экспериментов по преодолению препятствий шнековыми рабочими органами

На рисунке 2.21 представлены осциллограммы, полученные в результате проведения виртуального эксперимента по преодолению препятствия высотой 0 мм (условная глубина обработки 100 мм).



*a* -  $R_x$  – горизонтальная сила тяги  $R_x$ ; *б* – сила боковая  $R_y$ ; *в* – сила вертикальная  $R_z$ ; *г* – крутящий момент гидромотора; *д* – сила на пружине; *е* – длина пружины

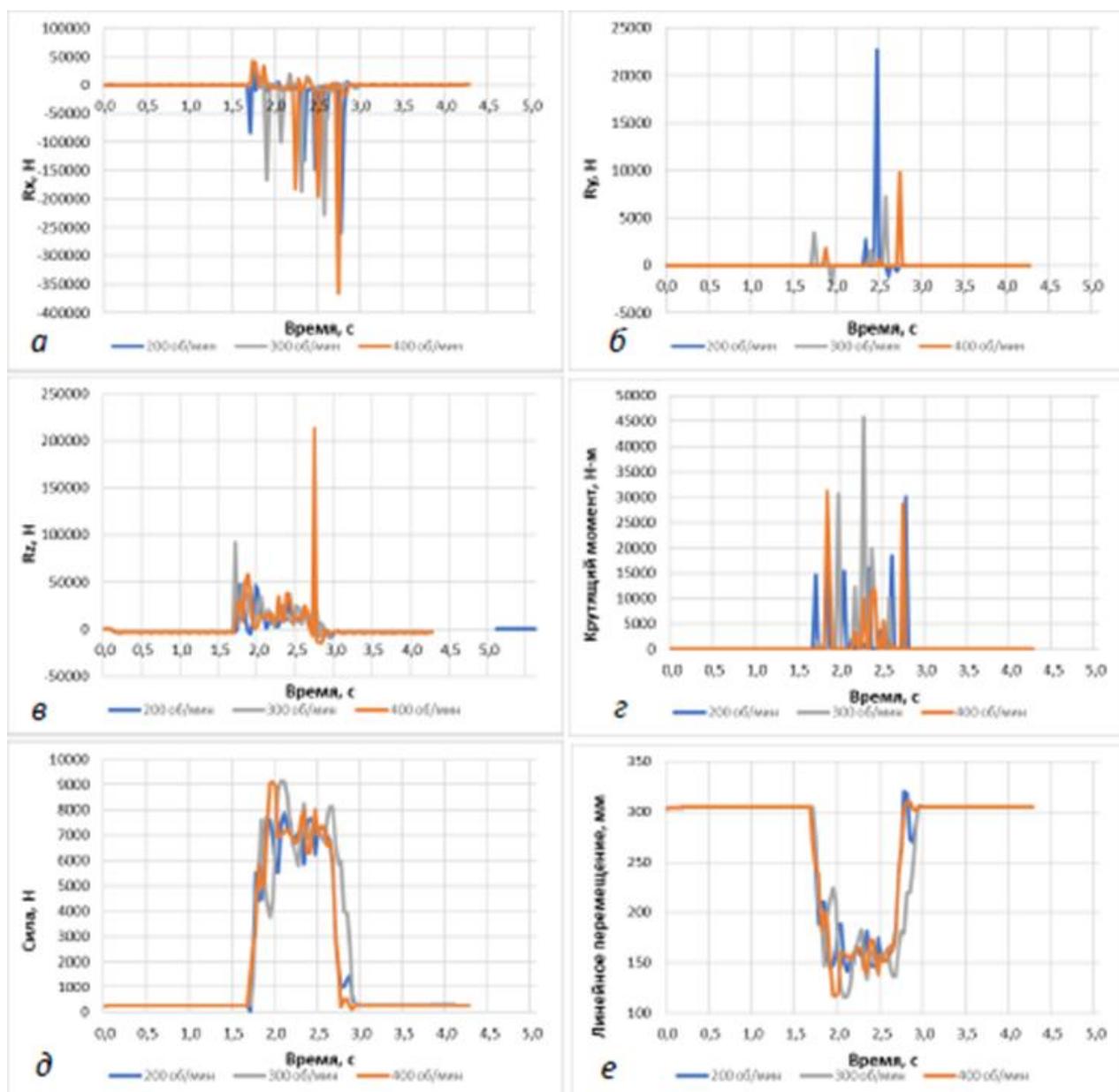
Рисунок 2.21 – Динамометрирование процесса преодоления пня высотой 0 мм

Всплеск тягового усилия  $R_x$  (рисунок 2.21, а) при наезде шнекового рабочего органа на препятствие при частоте вращения 400 об/мин сначала имеет положительное значение равное 50 кН, а затем при преодолении препятствия за

счет эффекта подталкивания из-за крутящего момента гидромотора имеет отрицательное значение около -200 кН. При частоте вращения 300 об/мин сначала имеет положительное значение 25 кН, а затем имеет отрицательное значение равное -170 кН. При частоте вращения 200 об/мин сначала имеет положительное значение 15 кН, а затем имеет отрицательное значение равное -140 кН. Поперечная сила  $R_y$  (рисунок 2.21, б) при частоте вращения 400 об/мин равна 24 кН. При частоте вращения 300 об/мин имеет положительное значение 33 кН, при частоте вращения 200 об/мин имеет положительное значение 2,5 кН. Вертикальная нагрузка  $R_z$  (рисунок 2.21, в) при частоте вращения 400 об/мин достигает значения 32 кН, при частоте 300 об/мин равна 50 кН, а при частоте 200 об/мин равна 30 кН. Крутящий момент гидромотора (рисунок 2.21, г) максимальное значения имеет 42 кНм при частоте вращения 400 об/мин, при частоте вращения 300 об/мин равен 52 кНм, а при частоте 200 об/мин равен 35 кНм. Сила на пружине предохранительного устройства (рисунок 2.21, д) при частоте вращения 400 об/мин достигает значения 4 кН, при частоте 300 об/мин равна 6 кН, а при частоте 200 об/мин равна 5,5 кН. Изменение длины пружины при преодолении препятствий (рисунок 2.21, е) при частоте вращения 400 об/мин достигает значения 190 мм, при частоте 300 об/мин равна 180 мм, а при частоте 200 об/мин равна 200 мм.

На рисунке 2.22 представлены данные, полученные в результате проведения виртуального эксперимента по преодолению препятствия высотой 50 мм (условная глубина обработки 100 мм). Тяговое усилие  $R_x$  (рисунок 2.22, а) при наезде на препятствие при частоте вращения 400 об/мин имеет отрицательное значение равное 352 кН. Поперечная сила  $R_y$  (рисунок 2.22, б) при частоте вращения 200 об/мин равна 22 кН. Вертикальная нагрузка  $R_z$  (рисунок 2.22, д) при частоте вращения 400 об/мин достигает значения 220 кН, а при частоте 300 об/мин - 80 кН. Крутящий момент гидромотора (рисунок 2.22, г) максимальное значения имеет 45 кНм при частоте вращения 300 об/мин, при частоте вращения 400 об/мин 32 кНм, а при частоте 200 об/мин составляет 17 кНм. Сила на пружине предохранительного устройства (рисунок 2.22, д) достигает значения 9

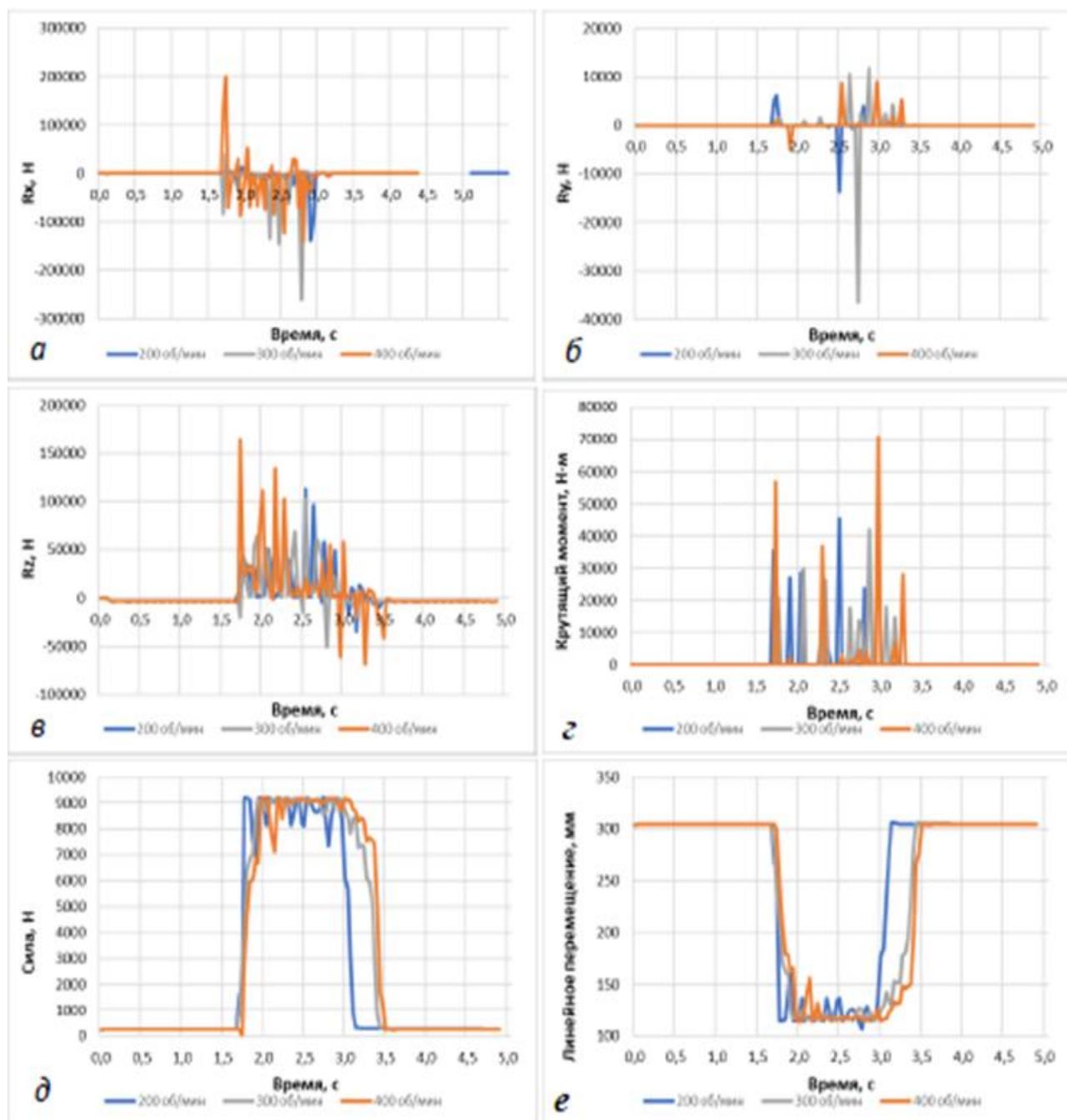
кН при 400 об/мин, при частоте вращения 300 об/мин 7,5 кН, а при частоте вращения 200 об/мин 5,5 кН. Изменение длины пружины при преодолении препятствий (рисунок 2.22, е) при частоте вращения 200 об/мин составляет 150 мм, при частоте вращения 300 об/мин и 400 об/мин изменение длины пружины составляет около 125мм.



*a* – сила  $R_x$ ; *б* – сила  $R_y$ ; *в* – сила  $R_z$ ; *г* – момент двигателя; *д* – сила на пружине; *е* – длина пружины

Рисунок 2.22 – Динамометрирование процесса преодоления препятствия высотой 50 мм

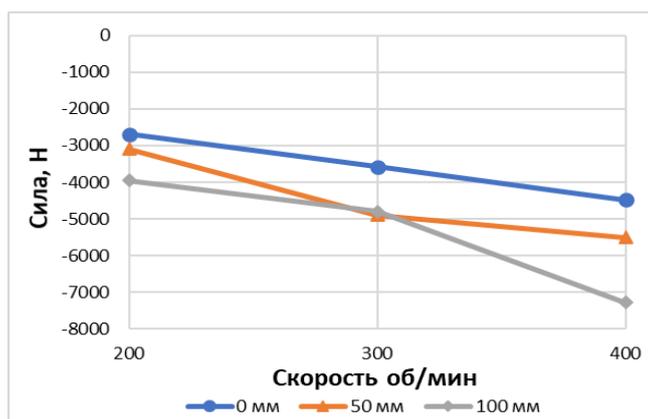
На рисунке 2.23 представлены данные, полученные в результате проведения виртуального эксперимента по преодолению препятствия высотой 100 мм (условная глубина обработки 100 мм).



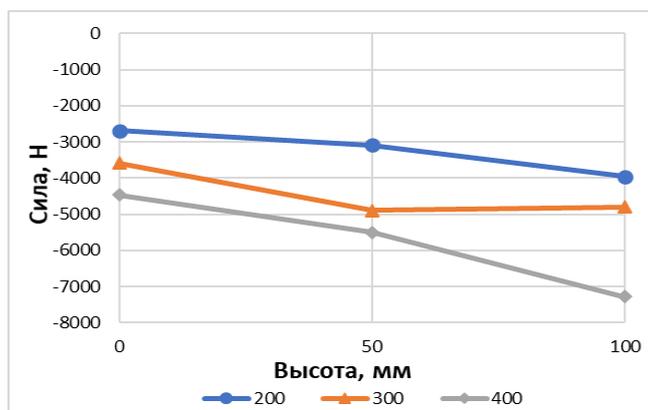
*a* – сила  $R_x$ ; *б* – сила  $R_y$ ; *в* – сила  $R_z$ ; *г* – момент двигателя; *д* – сила на пружине; *е* – изменение длина пружины

Рисунок 2.23 – Динамометрирование процесса преодоления препятствия высотой 100 мм

Тяговое усилие  $R_x$  (рисунок 2.23, а) при наезде на препятствие при частоте вращения 400 об/мин имеет положительное значение равное 200 кН, а при частоте вращения 300 об/мин имеет отрицательное значение равное -250 кН. Поперечная сила  $R_y$  (рисунок 2.23, б) при частоте вращения 300 об/мин равна -35 кН. Вертикальная нагрузка  $R_z$  (рисунок 2.23, в) при частоте вращения 400 об/мин достигает значения 160 кН, а при частоте 300 об/мин- 110 кН. Крутящий момент гидромотора (рисунок 2.23, г) максимальное значения имеет 70 кНм при частоте вращения 400 об/мин, а при частоте вращения 300 об/мин равен 45 кНм. Сила на пружине предохранительного устройства (рисунок 2.23, д) достигает значения 9 кН при всех частотах вращения. Изменение длины пружины при преодолении препятствий (рисунок 2.23, е) при частотах вращения 300 об/мин и 400 об/мин, изменение длины пружины составляет 125мм.



а



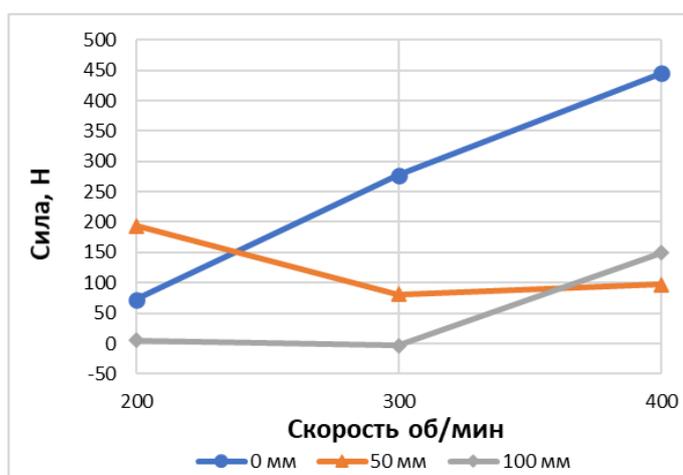
б

Рисунок 2.24 – Зависимости тягового сопротивления  $R_x$  от частоты вращения (а) и от высоты пня (б)

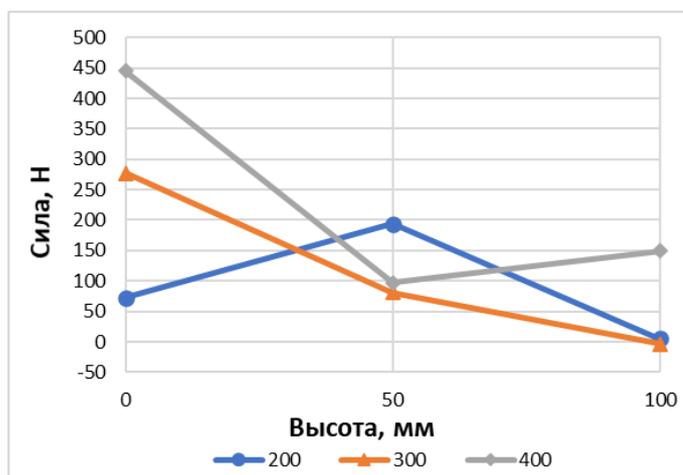
На рисунке 2.24 изображены зависимости среднего значения тягового сопротивления  $R_x$  от частоты вращения (*a*) и от высоты препятствия (*б*).

Зависимость тягового сопротивления  $R_x$  от высоты препятствия от 0 до 100 мм (рисунок 2.24) при 200 об/мин изменяется от -3,2 кН до -4 кН, при частоте вращения 300 об/мин изменяется от -3,5 кН до -5 кН, при частоте вращения 400 об/мин изменяется от -4,5 кН до -7,2 кН.

На рисунке 2.25 показаны зависимости, поперечной силы  $R_y$  от высоты препятствия и скорости вращения шнека.



*a*



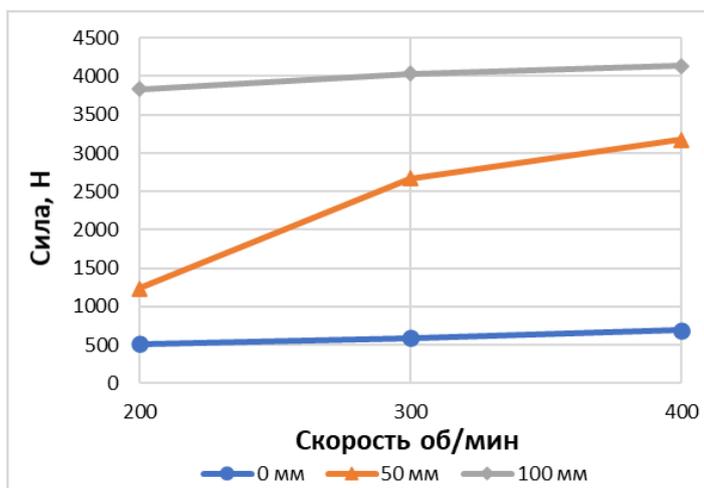
*б*

*a* – от скорости вращения шнекового рабочего органа; *б* – от высоты препятствия

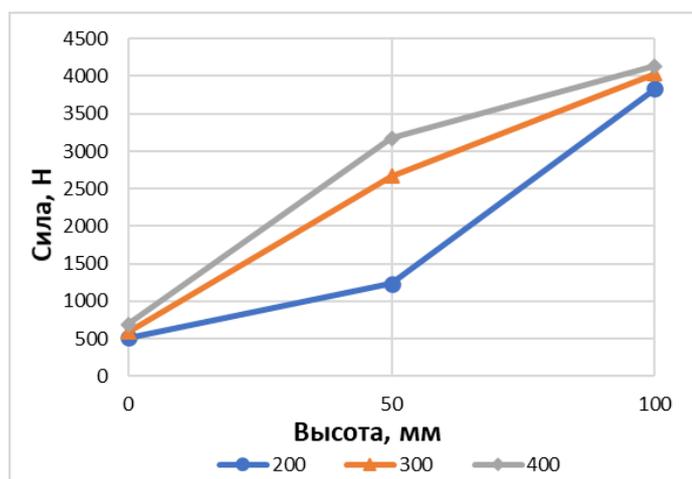
Рисунок 2.25 – Зависимости поперечной силы  $R_y$  от частоты вращения (*a*) и от высоты пня (*б*)

Из рисунка 2.25 видно, что поперечная сила  $R_y$  не достигает значительных значений и изменяется практически случайным образом. Это связано с тем, что шнековый рабочий орган и препятствие имеют симметричную форму относительно продольно – вертикальной плоскости, что практически исключает боковые уводы рабочего органа в процессе преодоления препятствия.

На рисунке 2.26 представлены зависимости, вертикальной силы  $R_z$  от высоты препятствия и скорости вращения шнека.



а)



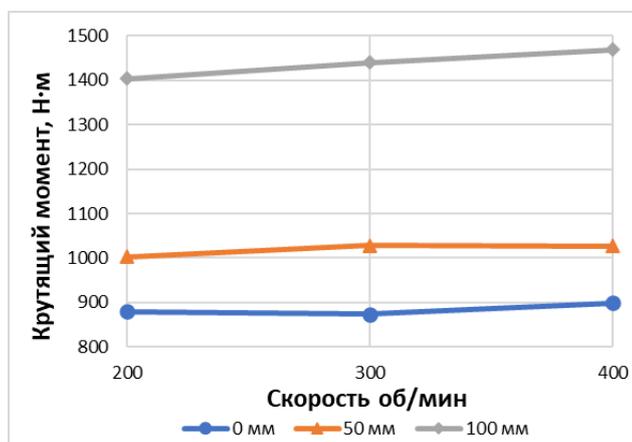
б)

$a$  – от скорости вращения шнекового рабочего органа;  $b$  – от высоты пня

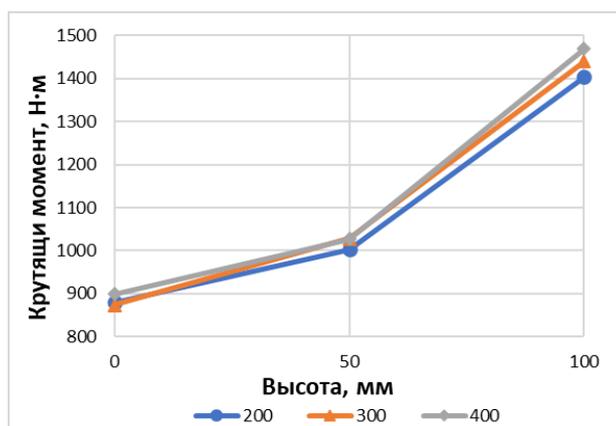
Рисунок 2.26 – Зависимости вертикальной нагрузки  $R_z$  от частоты вращения ( $a$ ) и от высоты пня ( $b$ )

Из рисунка 2.26 (а) видно, что вертикальная нагрузка  $R_z$ , при частоте вращения от 200 об/мин до 400 об/мин изменяется при высоте препятствий 100 мм от 3,8 кН до 4,2 кН. При высоте препятствий 50 мм, сила  $R_z$  изменяется от 1,2 кН до 3 кН. При высоте пня на уровне почвы (0 мм) вертикальная нагрузка  $R_z$  изменяется от 0,5 кН до 0,52 кН. При изменении высоты препятствий (рисунок 2.26, б) от 0 до 100 мм, сила  $R_z$  изменяется по ломанной кривой. При частоте вращения 400 об/мин изменяется от 0,55 кН до 3,5 кН, при частоте вращения 200 об/мин от 0,5 кН до 3,7 кН. Где 300 об/мин от 0,5 кН до 3,5 кН.

На рисунке 2.27 представлены зависимости крутящего момента от высоты препятствия и скорости вращения шнека.



а)



б)

*a* – от скорости вращения шнека; *б* – от высоты пня

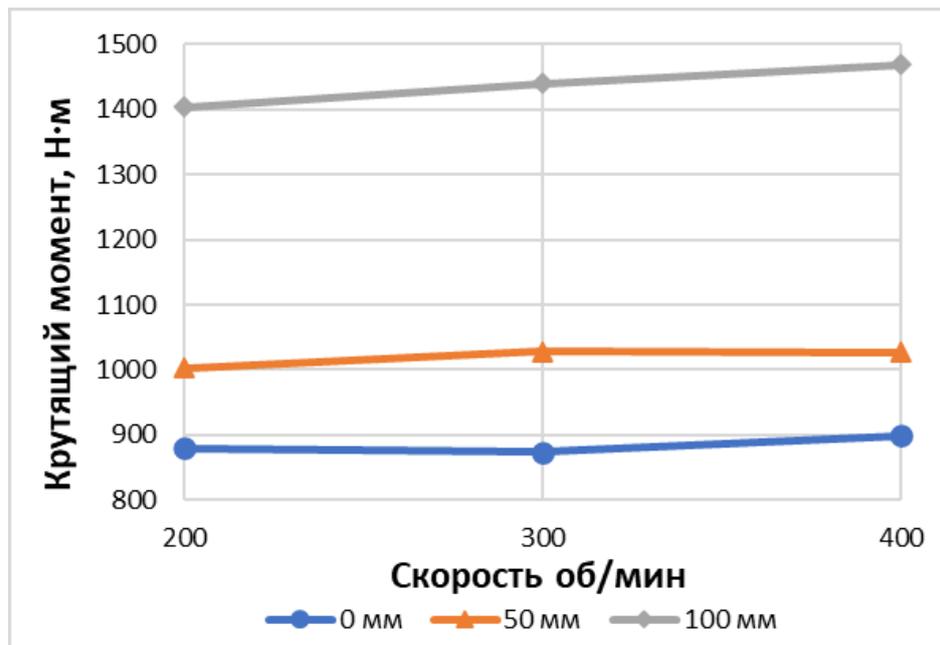
Рисунок 2.27 – Зависимости средних значений крутящего момента

Из рисунка 2.27 (а) видно, что крутящий момент на валу гидромотора в зависимости от частоты вращения изменяется по линейному закону. При частоте вращения 200 об/мин и преодолении высоты препятствия 0 мм минимальное среднее значение крутящего момента составляет 880,20 Н·м, а максимальное значение равно 900 Н·м. При частоте вращения 300 об/мин и преодолении высоты препятствия 50 мм минимальное среднее значение крутящего момента составляет 1000 Н·м, а максимальное значение 1100 Н·м. При частоте вращения 400 об/мин и преодолении высоты препятствия 100 мм минимальное среднее значение крутящего момента составляет 1400 Н·м, а максимальное значение 1480 Н·м. Из рисунка 2.27 (б) видно, что при частоте вращения 200 об/мин, 300 об/мин и 400 об/мин, при преодолении высоты препятствия 0 мм минимальное среднее значение крутящего момента составляет около 900 Н·м, а максимальное значение в диапазоне 900...1480 Н·м.

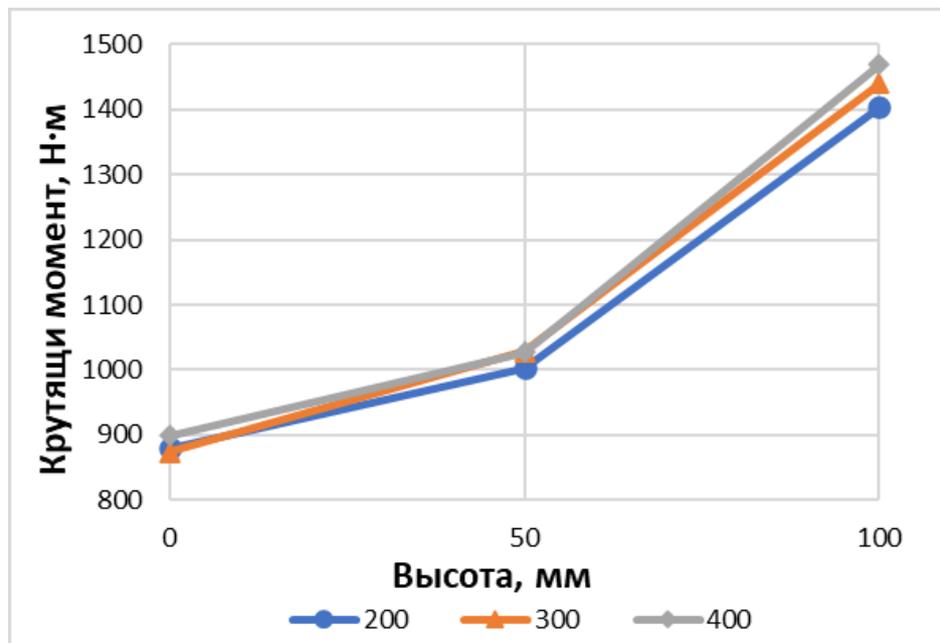
На рисунке 2.28 представлены зависимости, силы на пружинах предохранительного механизма шнека при преодолении препятствий.

Из рисунка 2.28 (а) видно, что при частоте вращения 200 об/мин и преодолении высоты препятствия 0 мм минимальное среднее значение силы на пружинах составляет 4168 Н, а максимальное значение равно 4400 Н. При частоте вращения 300 об/мин и преодолении высоты препятствия 50 мм минимальное среднее значение силы на пружинах составляет 5700 Н, а максимальное значение 6700 Н. При частоте вращения 400 об/мин и преодолении высоты препятствия 100 мм минимальное среднее значение силы на пружинах составляет 8100 Н, а максимальное значение 8400 Н·м.

Из рисунка 2.28 (б) видно, что при частоте вращения 200 об/мин, 300 об/мин и 400 об/мин при преодолении высоты препятствия 0 мм минимальное среднее значение силы на пружинах составляет 4000...4500 Н, а максимальное значение в диапазоне 8000...8200 Н.



а)

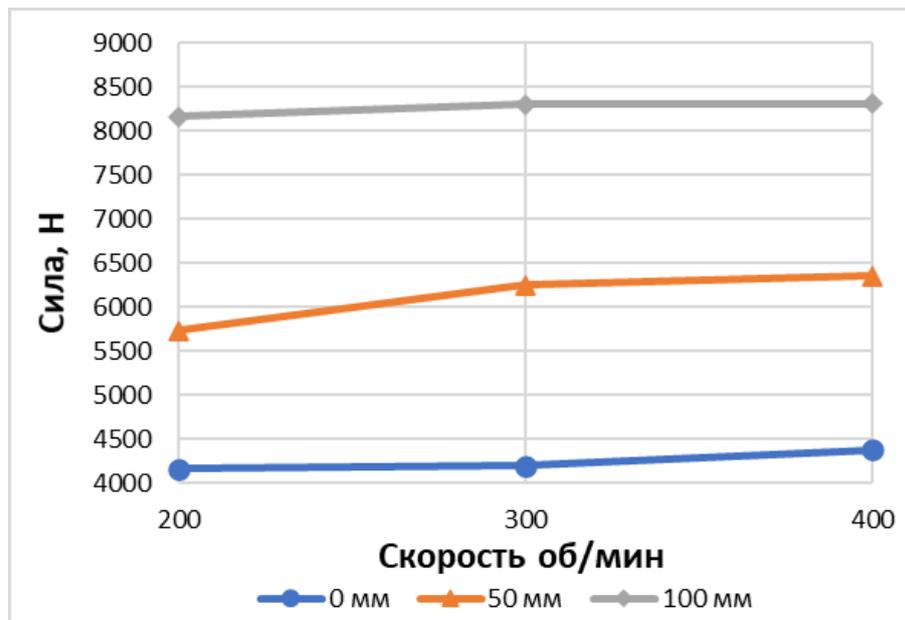


б)

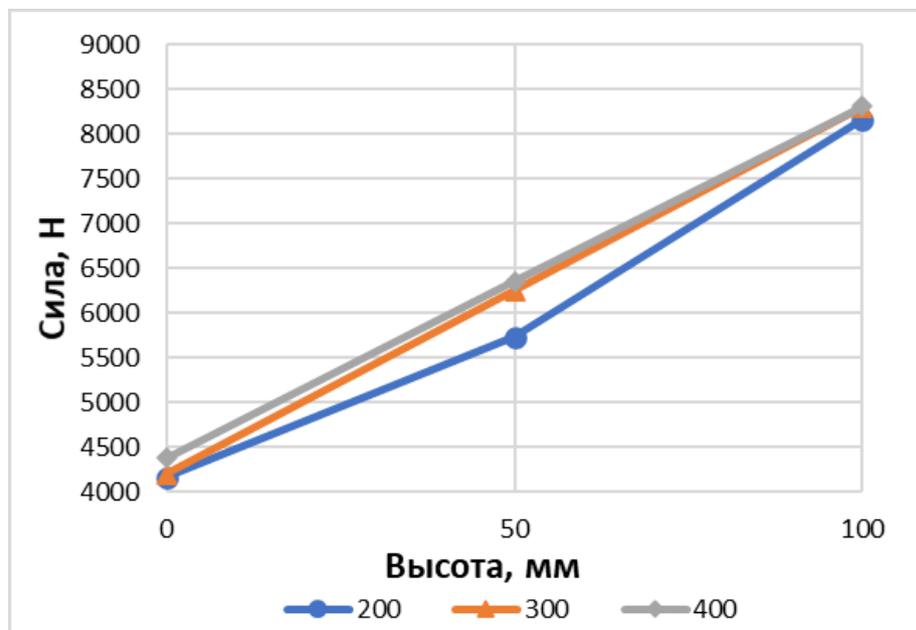
*a* – от скорости вращения шнека; *б* – от высоты пня

Рисунок 2.28 – Зависимости силы на пружинах предохранительного механизма шнека

На рисунке 2.29 показаны зависимости, длины пружины от высоты препятствия и скорости вращения шнека.



а)



б)

*a* – от скорости вращения шнекового рабочего органа; *b* – от высоты препятствия

Рисунок 2.29 – Зависимости средних значений длины пружин предохранительного механизма в процессе преодоления препятствия при различных режимах

Из рисунка 2.29 видно, что длина пружины предохранительного устройства при изменении частоты вращения шнека от 200 об/мин до 400 об/мин имеет линейный характер и изменяется не значительно, для высоты препятствия 0 мм длина пружины уменьшается от 220 мм до 210 мм. Для препятствия 50 мм от 160 мм до 150 мм, а для препятствий 100 мм, остается на уровне 120 мм. Зависимость длины пружины от высоты препятствий носит убывающий характер и уменьшается от величины 220 мм до 120 мм при преодолении препятствий от 0 мм до 100 мм [66-70, 160].

## 2.5 Выводы

1. Обоснована конструктивно – технологическая схема лесопожарного грунтомета – полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов, которая решает задачу повышения эффективности работы, за счет улучшения качества рыхления и удаления напочвенного покрова с растительными остатками из потока грунта и предохранения шнека от перегрузок при преодолении препятствий.

2. На основе разработанной имитационной модели лесопожарной грунтометательной машины со шнековым рабочим органом с применением метода динамики частиц исследовано влияние основных параметров рабочего органа на эффективность очистки рабочей полосы от напочвенного покрова. Разработана программа для ЭВМ (Свидетельство о регистрации № RU 2021663167, 12.08.2021)

3. Для обеспечения условия сплошности сдвига напочвенного покрова частота вращения шнекового барабана изменялась обратно пропорционально шагу винта  $s$  и составляла 7,2 об/с для  $s = 16$  см; 3,5 об/с для  $s = 33$  см; 1,8 об/с для  $s = 66$  см. Оптимальные диапазоны количества рыхлящих зубьев и величины их выступа над винтовой поверхностью шнека составляют 12 и 11 см соответственно и обеспечивают полноту очистки от напочвенного покрова более 80 % при потребляемой барабаном мощности менее 12 кВт. Оптимальная частота

вращения рабочего органа составляет около 5 об/с. При этом достигается полнота очистки более 0,89. Оптимальные диапазоны количества зубьев и величины выступа зубьев составляют 12 и 11 см соответственно и обеспечивают полноту очистки от напочвенного покрова более 80 %.

4. Исследования кинематических и динамических характеристик шнековых рабочих органов при преодолении препятствий проводились с помощью виртуального стенда, реализованного в среде инженерных расчетов SolidWorks Motion, использующей метод многотельной динамики (MBD).

5. Максимальное среднее значение тягового сопротивления 7279,79 Н наблюдается при преодолении препятствия высотой 100 мм и частоте вращения рабочего органа 400 об/мин, максимальное среднее значение силы на предохранительной пружине равно 8308,48 Н, а крутящий момент гидромотора привода шнека достигает значения 1468,49 Н·м, вертикальная сила на предохранительной пружине составляет 8308,48 Н.

### 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1 Программа и методика проведения полевых испытаний по методу полнофакторного эксперимента

Разработана программа и методика полевых исследований, предусматривающая определение динамики и качества рабочих процессов ЛГП. Исследования предполагали построение регрессионных моделей влияния количества зубьев  $N_n$  и длины зубьев  $h_n$  шнекового барабана на полноту очистки полосы обработки  $p_o$  (качественный показатель работы) и потребляемую шнековым барабаном мощность  $N_{ш}$  (энергетический показатель работы). Для решения поставленной задачи на основании предварительного компьютерного моделирования был выбран ортогональный центрально-композиционный план с нижеуказанными основными уровнями и интервалами варьирования факторов.

За варьируемые факторы были приняты: количество зубьев  $N_n$  и длина зубьев  $h_n$  шнекового барабана, позиции факторов, их уровни указаны в таблице 3.1. Функции отклика:  $y_1$  – полнота очистки полосы обработки от растительности, %;  $y_2$  – потребляемая шнековым барабаном мощность, кВт.

Порядок проведения экспериментов:

1. Агрегат по команде начинал движение, при этом шнек заглублялся и начинал производить расчистку экспериментального участка от поросли, которая сдвигалась по бокам шнековых лент. Величина ножей, устанавливаемых на ленты шнека варьировалась от 30 мм до 90 мм.

2. В конце прохода происходило выглубление и выключался гидрораспределитель и прекращалось вращение шнека. Лабораторная установка поднималась в транспортное положение.

Таблица 3.1– Определение уровней и интервалов варьирования факторов

Фактор		Уровни факторов			Интервал варьиро- вания	
Наименование	Обозначение					
	Натуральное	Нормали- зованное	верхний	основной	нижний	
Количество ножей, шт.	$N_n(x_1)$	$X_1$	8	10	12	2
Длина ножей, см	$h_n(x_2)$	$X_2$	8	10	12	2

3. Каждый опыт полевых испытаний записывался в журнал наблюдений, замерялись гидравлическое давление в напорной магистрали системы, и проводились измерения глубины работы шнековых лент с ножами при различных величинах ножей шнековых лент.

### 3.2 Изготовление экспериментального образца новой машины с шнековым рабочим органом

Для определения качественных и энергетических показателей была изготовлена лабораторная установка со шнековыми рабочими органами. Рама лабораторной установки изготавливалась из швеллеров № 10 и уголков с шириной полок 75 мм.

Изготовление экспериментального образца новой машины с шнековым рабочим органом производилось на основе разработанной нами конструктивно-технологической схемы новизна, которой подтверждена патентом на изобретение № RU 2762 160 C1 от 10.06.21 г.

Лента шнека изготовлена из стали 45, имеет толщину 6 мм. и приваривалась к стальной трубе с внешним диаметром 325 мм, длиной 600 мм. Шаг витка спирали шнека 150 мм, высота ленты 50 мм, толщина стенки 6 мм (рисунок 3.1)

При помощи фрезерного и токарного станков изготавливались втулки (рисунок 3.2) диаметром 25 мм и пальцы (рисунок 3.1) диаметром 16 мм и длиной 30, 60, 90 мм., для монтажа на шнековом рабочем органе по 8 штук на каждом шаге шнека.



1 - труба барабана; 2 - лента шнека; 3 - втулки; 4 - стопорные болты

Рисунок 3.1 – Процесс изготовления рабочего органа ЛГП



Рисунок 3.2 – Процесс изготовления втулок вид сверху с боковыми отверстиями и болтами для фиксации стержневых зубьев

Привод шнеков осуществляется через конический редуктор с двумя выходными валами, соединенными со шнеками. К входному валу редуктора подсоединен через муфту вал гидромотора НПА-64. Корпус гидромотора соединен

с рамой посредством специального сварного кронштейна (рисунок 3.4). Лабораторная установка была изготовлена для исследования качественных показателей полноты очистки полосы от горючих растительных остатков, так как в составе ЛПП определение качественных показателей затруднено. В конструкции идут сферические диски, а за тем роторы метатели. Данная лабораторная установка со шнековыми рабочими органами агрегатировалась с колесным трактором МТЗ – 82 на открытых задернелых участках. В начале опытов определялось количество травянистой растительности на одном квадратном метре, а после прохода установки производился подсчет оставшиеся растительности.



1 – барабан шнека; 2 – гидромотор; 3 – редуктор; 4 – рама  
5 – навесное устройство

Рисунок 3.4 – Общий вид лабораторной установки

Для полевых исследований шнековые рабочие органы были смонтированы на переднюю часть рамы грунтомета – полосопрокладывателя в агрегате с трактором Т-150К (рисунок 3.5). Гидромотор привода шнековых рабочих органов был подсоединен к гидросистеме трактора.



1 – шнековый рабочий орган; 2 – стержневые зубья; 3 – сферические диски; 4 – фрезы-метатели; 5 – гидромотор

Рисунок 3.5 – Лесопожарная грунтометательная машина со шнековыми рабочими органами

### 3.3 Аппаратура для определения энергетических показателей шнековых рабочих органов

При полевых исследованиях проводилось снятие показаний с помощью измерительной тензометрической системы ZET 058 и датчика давления ZET 315 (BC 315), который был установлен в напорную магистраль гидромотора марки НПА – 64. На рисунке 3.6 представлена тензометрическая станция Z058,

а на рисунке 3.7 показан датчик давления ZET 315 (BC 315) (а), контактный тахометр 8001 (б), для замеров частоты вращения шнекового рабочего органа.



Рисунок 3.6 – Тензометрическая станция Z058



а)



б)

Рисунок 3.7 – Датчик давления ZET315 (BC 315) (а), контактный тахометр 8001 (б)

### 3.4 Выводы

1. Разработана методика проведения полевых испытаний по методу полнофакторного эксперимента. За варьируемые факторы были приняты: количество ножей  $N_n$  и длина ножей  $h_n$  шнекового барабана. Функции отклика:  $y_1$  – полнота очистки полосы обработки от растительности, %;  $y_2$  – потребляемая шнековым барабаном мощность, кВт.

2. Изготовлена лабораторная установка для исследования качественных показателей полноты так как в составе ЛПП определение качественных показателей затруднено, так как идут сферические диски, а за тем роторы метатели. очистки полосы от горючих растительных остатков.

3. Изготовлен экспериментальный образец новой машины с шнековым рабочим органом на основе разработанной нами конструктивно-технологической схемы новизна, которой подтверждена патентом на изобретение № RU 2762 160 C1 от 10.06.21 г.

4. Для полевых исследований шнековые рабочие органы были смонтированы на переднюю часть рамы грунтомета – полосопрокладывателя в агрегате с трактором Т-150К. Гидромотор привода шнековых рабочих органов был подсоединен к гидросистеме трактора.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

### 4.1 Определение качественных показателей шнековых рабочих органов лабораторной установки

После прохода трактора в агрегате с лабораторной установкой по оси движения оставалась полоса шириной около 55 см с выбранным напочвенным покровом (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Испытания лабораторной установки со шнековыми рабочими органами в работе

Измерения ширины противопожарной полосы производилось с помощью рулетки рисунок 4.2, а также производился подсчёт, оставшийся травянистой растительности, на одном погонном метре.

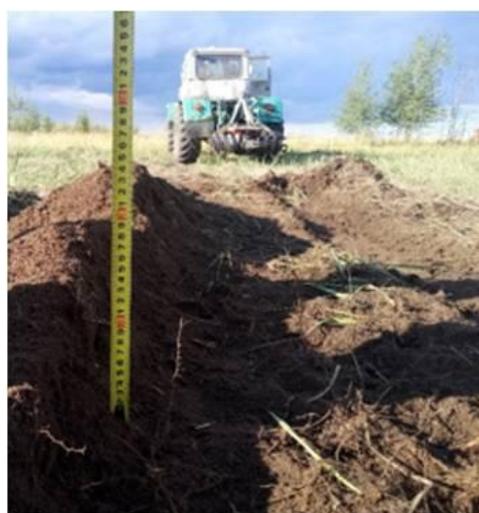


Рисунок 4.2 – Измерения параметров сечения поверхности почвы

Непосредственно в месте работы шнеков можно было изучить эффективность работы шнека по форме почвенного вала (рисунок 4.3, а) и углубления (рисунок 4.3, б). По высоте углубления контролировали величину заглубления шнеков  $a_p$  и высоту  $h_B$  бокового вала, формируемого шнеком.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Измерения параметров сечения поверхности по форме почвенного вала (а) и углубления (б)

## 4.2 Определение динамических параметров рабочих процессов шнеков

В результате записи динамических характеристик с помощью датчиков давления в напорной и сливных гидролиниях гидромотора и тензометрической системы ZET 058 получены осциллограммы давления рабочей жидкости при различном количестве и длине зубьев на шнеке согласно матрице полнофакторного эксперимента.

На рисунках 4.4–4.6 в качестве примера приведены образцы осциллограмм для четырех, шести и восьми радиальных зубьев на одном шаге шнеке.

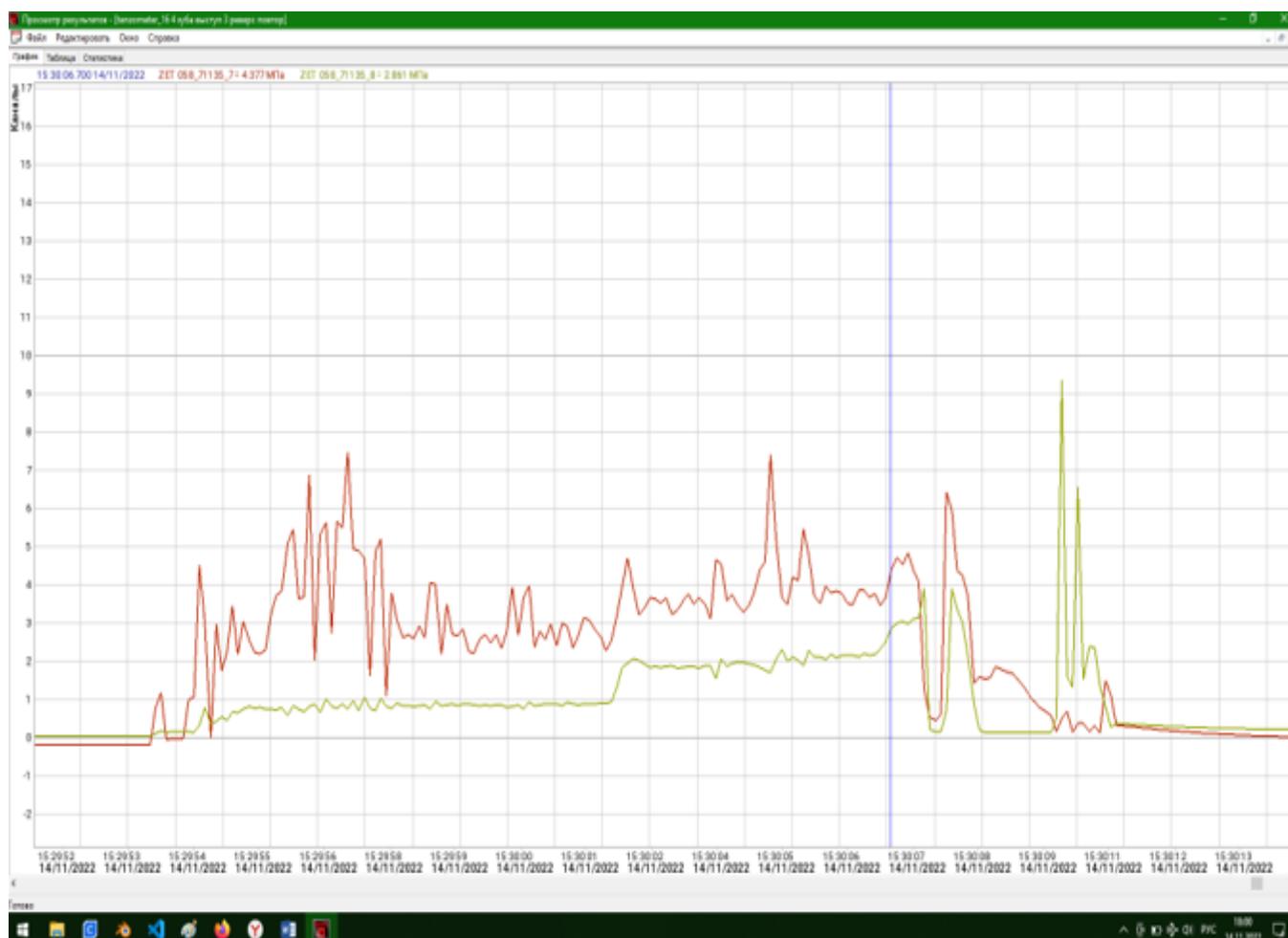


Рисунок 4.4 – Осциллограмма давления рабочей жидкости в гидромоторе привода шнека, количество зубьев 4, высота зубьев 9 см

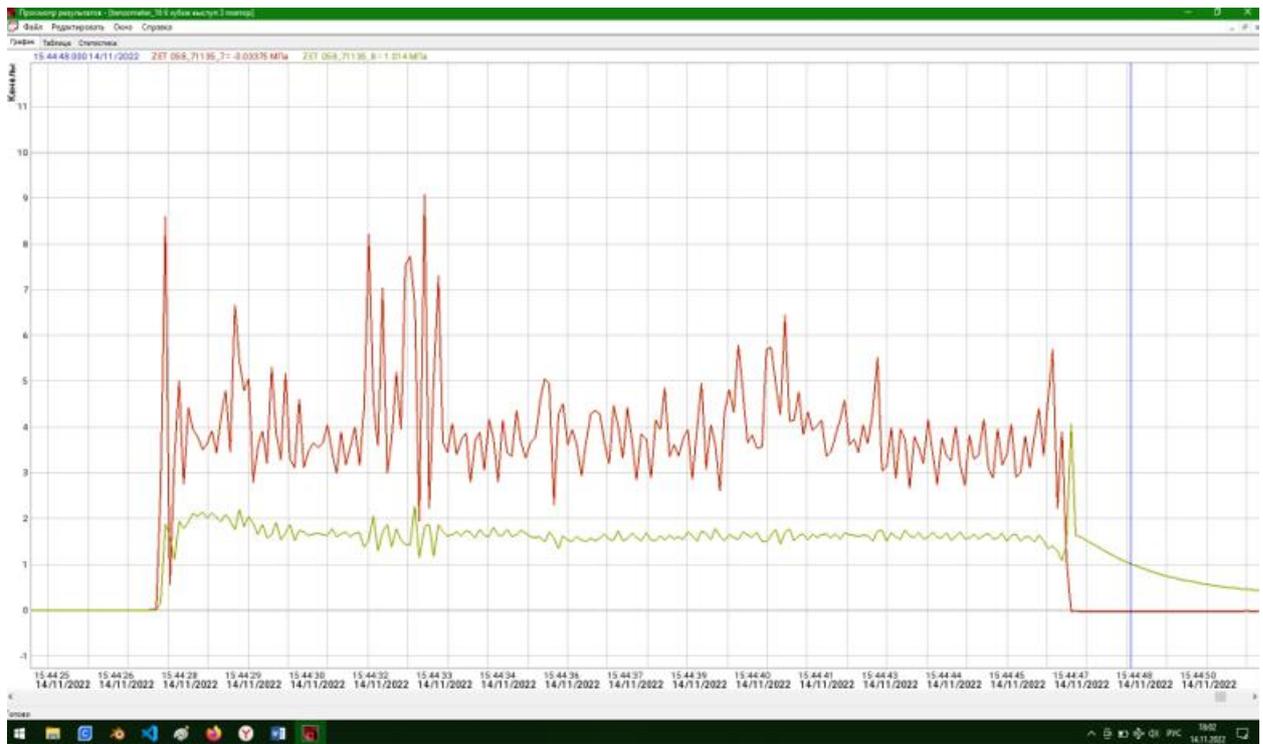


Рисунок 4.5 – Осциллограмма давления рабочей жидкости в гидромоторе привода шнека, количество зубьев 6, высота зубьев 9 см



Рисунок 4.6 – Осциллограмма давления рабочей жидкости в гидромоторе привода шнека, количество зубьев 8, высота зубьев 9 см

В результате статистической обработки осциллограмм давления рабочей жидкости в гидромоторе привода шнека при различном количестве и высоте стержневых зубьев получены зависимости давления рабочей жидкости от количества и высоты зубьев. Статистическая обработка осциллограмм приведена на рисунках 4.7, 4.8. Установлено, что при четырех зубьях среднее давление составляет 3,3 МПа, при шести зубьях 4,1 МПа, при восьми зубьях 5,3 МПа, однако при увеличении количества зубьев амплитуда колебаний давления уменьшается.



Рисунок 4.7 – Гистораммы средних значений давления рабочей жидкости



Рисунок 4.8 – Гистораммы максимальных значений давления рабочей жидкости

### 4.3 Экспериментальная оптимизация параметров зубьев шнекового барабана

#### 4.3.1 Анализ экспериментальных данных по выявлению закона распределения выходных величин

В ходе подтверждения гипотезы о нормальности распределений функции отклика  $y_1$  проведем проверку по критерию  $\chi^2$  – Пирсона. Для проведения анализа разобьем выборку на 6 интервалов (таблица 4.1). В таблица 4.2 и 4.4 произведен расчет критерия Пирсона, в таблице 4.3 представлены результаты выполненных серий опытов.

Таблица 4.1– Результаты серии выполненных опытов

№оп	$y_1$ , %	№оп	$y_1$ , %	№оп	$y_1$ , %
1	78	11	74	21	75
2	74	12	73	22	77
3	70	13	78	23	74
4	76	14	84	24	76
5	81	15	70	25	78
6	73	16	76	26	80
7	75	17	74	27	75
8	70	18	77	28	73
9	75	19	66	29	77
10	78	20	73	30	68

Таблица 4.2 – Расчет критерия Пирсона

Интервал	Левый конец интер- вала	Правый конец интерва- ла	Сере- дина ин- тервала	Частота ( $p_i$ )	$p_i(y_i - u_{cp})^2$	Частоты теоретиче- ские ( $p_{теор}$ )	$(p_i - p_{теор})^2 / p_{теор}$
1	66,27	69,27	67,77	2	103,68	1,254267	0,44338123
2	69,27	72,27	70,77	3	52,92	5,003042	0,80194771
3	72,27	75,27	73,77	12	17,28	9,634843	0,58059782
4	75,27	78,27	76,77	9	29,16	8,95821	0,00019495
5	78,27	81,27	79,77	2	46,08	4,021277	1,01598608
6	81,27	84,27	82,77	2	121,68	0,871511	1,46124022

Для проверки по критерию  $\chi^2$  – Пирсона, разбиваем выборку на 6 интервалов (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Результаты серии выполненных опытов

№оп	$y_2$ , кВт	№оп	$y_2$ , кВт	№оп	$y_2$ , кВт
1	2,54	11	2,57	21	2,39
2	2,49	12	2,21	22	2,15
3	2,42	13	2,72	23	2,61
4	2,46	14	2,29	24	2,29
5	2,39	15	2,33	25	2,68
6	2,56	16	2,43	26	2,61
7	2,34	17	2,59	27	2,6
8	2,55	18	2,57	28	2,32
9	2,51	19	2,49	29	2,65
10	2,43	20	2,54	30	2,59

Таблица 4.4 – Расчет критерия Пирсона

Интервал	Левый конец интер- вала	Правый конец ин- тервала	Сере-дина интер- вала	Частота ( $p_i$ )	$p_i(y_i - y_{cp})^2$	Частоты тео- ретические ( $p_{теор}$ )	$(p_i - p_{теор})^2 / p_{теор}$
1	2,15	2,25	2,2	2	0,1568	1,271591	0,41725718
2	2,25	2,35	2,3	5	0,162	3,815206	0,36793214
3	2,35	2,45	2,4	5	0,032	7,099425	0,62083682
4	2,45	2,55	2,5	6	0,0024	8,193375	0,58716862
5	2,55	2,65	2,6	9	0,1296	5,864581	1,67631005
6	2,65	2,75	2,7	3	0,1452	2,603428	0,06040856

Расчетное значение критерия  $\chi^2$  – Пирсона составило 3,73. Табличное значение критерия  $\chi^2$  – Пирсона для данного выбранного значения равно 7,815, исходя из  $7,815 > 3,73$ , принимаем гипотезу нормального распределения случайной величины.

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma_x^2 \cdot (N_c + d_{cp})}{\beta^2 M_x^2 \cdot N_c} = 4,74 \rightarrow 5 \quad (4.1)$$

Определяем необходимое количество повторяющихся опытных экспериментов ( $n$ ) для планов 2-го порядка по выражению:

$$\sigma_x^2 = 0,02, M_x = 2,48, t = 2,05, \beta = 6,5\%, N_c = 9, d_{cp} = 4,14 \quad (4.2)$$

где - соответственно дисперсия, среднее арифметическое выборки, критерий Стьюдента, относительное отклонение отклика, число опытов плана, средняя дисперсия по области планирования.

4.3.2 Построение регрессионной модели влияния на полноту очистки обрабатываемой полосы параметров шнекового рабочего органа  
Матрица планирования эксперимента по определению полноты очистки

полосы обработки и результаты опытов представлены в таблице 4.5.

Для исключения систематических ошибок проведена рандомизация опытов с помощью таблицы случайных чисел (количество серий опытов соответствует числу дублированных опытов).

Таблица 4.5 – Матрица планирования эксперимента

№	Рандомизация (5 серий)					X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	y <sub>1</sub> ,%	y <sub>2</sub> ,%	y <sub>3</sub> ,%	y <sub>4</sub> ,%	y <sub>5</sub> ,%	$\bar{y}_j$ ,%	S <sub>j</sub> <sup>2</sup>
	1	2	3	4	5									
1	4	2	1	6	3	-1	-1	75	74	70	76	80	75	13
2	2	9	2	1	9	1	-1	78	73	79	79	80	77,8	7,7
3	3	4	8	9	5	-1	1	79	73	80	83	81	79,2	14,2
4	7	6	9	5	1	1	1	83	87	82	84	81	83,4	5,3
5	9	8	5	4	6	-1	0	77	79	78	75	78	77,4	2,3
6	8	5	7	2	4	1	0	81	82	82	79	80	80,8	1,7
7	1	7	4	3	2	0	-1	76	73	78	79	74	76	6,5
8	5	3	1	7	8	0	1	81	75	87	82	82	81,4	18,3
9	9	1	6	8	7	0	0	79	85	76	77	77	78,8	13,2

где  $\bar{y}_j$ ,  $S_j^2$  – соответственно среднее значение отклика и дисперсия.

Регрессионную модель влияния параметров шнекового рабочего органа на полноту очистки полосы будем искать в виде многочлена:

$$y_1 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3(X_1^2 - a) + b_4(X_2^2 - a) + b_5X_1X_2 \quad (4.3)$$

где,  $a$  – параметр смещения (для двухфакторного эксперимента:  $a = 2/3$ ).

Расчетные коэффициенты регрессионной модели представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Коэффициенты регрессии математической модели

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
78,8667	2,0667	2,5333	0,2	-0,2	0,35

Выполнив преобразования, получим уравнение регрессии в натуральном виде:

$$y_1 = 55,87 + 1,034x_1 + 1,267x_2 \quad (4.4)$$

Проведя анализ полученной модели (4.4), можно отметить, что более значимое влияние на полноту очистки оказывает изменение длины выступа ножей (коэффициент при  $x_2$  больше коэффициента при  $x_1$ ,  $1,267 > 1,034$ ), менее сильное - изменение количества ножей; при этом с увеличением, как количества ножей, так и их длины полнота очистки повышается (оба коэффициента положительные, рисунок 4.9). Поверхность отклика целевой функции  $y_1$  согласно компьютерной модели близка к поверхности параболического цилиндра, но в выбранной области значений факторов имеет незначительную кривизну, о чем свидетельствует незначимость коэффициентов  $b_3, b_4, b_5$  и может быть аппроксимирована плоскостью.

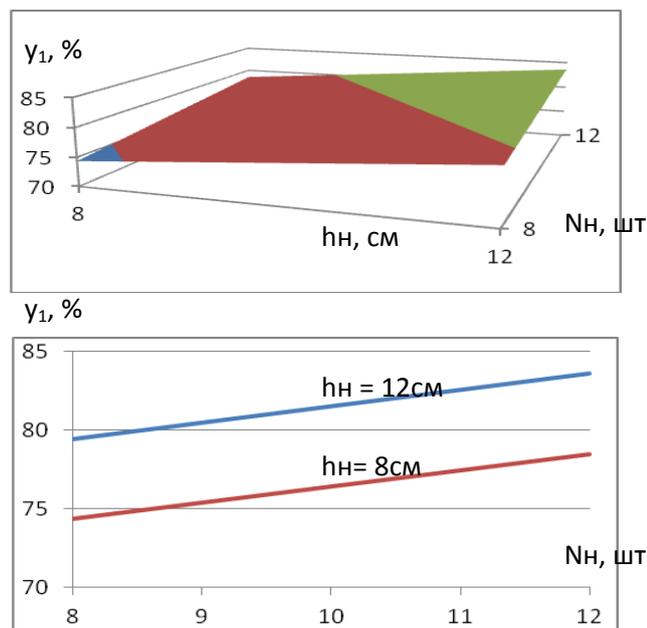


Рисунок 4.9 – Зависимости полноты очистки от количества зубьев при различной длине зубьев

### 4.3.3 Построение регрессионной модели влияния на потребляемую мощность параметров шнекового рабочего органа

Матрица планирования эксперимента по определению влияния количества ножей и длины ножей на потребляемую шнековым барабаном мощность и результаты опытов представлены в таблице 4.7.

Для исключения систематических ошибок проведена рандомизация опытов с помощью таблицы случайных чисел (количество серий опытов соответствует числу дублированных опытов).

Таблица 4.7 – Матрица планирования эксперимента

№	Рандомизация (5 серий)					X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	y <sub>1</sub> , %	y <sub>2</sub> , %	y <sub>3</sub> , %	y <sub>4</sub> , %	y <sub>5</sub> , %	$\bar{y}_j$	S <sub>j</sub> <sup>2</sup>
	1	2	3	4	5									
1	4	2	1	6	3	-1	-1	2,51	2,67	2,63	2,46	2,23	2,5	0,030
2	2	9	2	1	9	1	-1	2,78	2,84	2,69	2,78	2,69	2,756	0,004
3	3	4	8	9	5	-1	1	2,81	2,99	2,74	2,66	3,01	2,842	0,024
4	7	6	9	5	1	1	1	3,11	3,09	3,38	3,18	2,79	3,11	0,045
5	9	8	5	4	6	-1	0	2,67	2,76	2,68	2,56	2,57	2,648	0,007
6	8	5	7	2	4	1	0	2,96	3,02	2,92	3,13	3,07	3,02	0,007
7	1	7	4	3	2	0	-1	2,63	2,78	2,72	2,49	2,44	2,612	0,021
8	5	3	1	7	8	0	1	2,94	2,8	3,09	2,83	2,78	2,888	0,016
9	9	1	6	8	7	0	0	2,8	2,82	2,92	2,87	2,7	2,822	0,007

где  $\bar{y}_j, S_j^2$  – соответственно среднее значение отклика и дисперсия.

Расчетные коэффициенты регрессионной модели представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Коэффициенты регрессии математической модели

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
2,8	0,133	0,162	0,039	-0,045	0,003

Выполнив преобразования, получим уравнение регрессии в натуральном виде:

$$y_1 = 1,32 + 0,067x_1 + 0,081x_2 \quad (4.5)$$

После проведения анализ в полученной модели (4.5), стоит отметить, что большее значение на расходуемую мощность демонстрирует изменения в длине выступающих зубьев (коэффициент при  $x_2$  больше коэффициента при  $x_1$ ,  $0,081 > 0,067$ ), менее сильное - изменение количества ножей; при этом с увеличением, как количества ножей, так и их длины потребляемая мощность повышается (оба коэффициента положительные). Поверхность отклика (рисунок 4.10) целевой функции  $y_2$  согласно компьютерной модели близка к поверхности параболического цилиндра, но в выбранной области значений факторов имеет незначительную кривизну, о чем свидетельствует незначимость коэффициентов  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  и может быть аппроксимирована плоскостью.

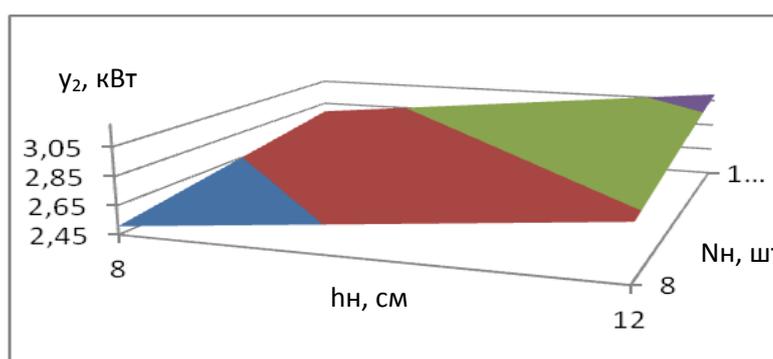


Рисунок 4.10 – Зависимости мощности от числа зубьев и длины

На рисунке 4.11 представлены зависимости мощности от количества зубьев при различной длине зубьев.

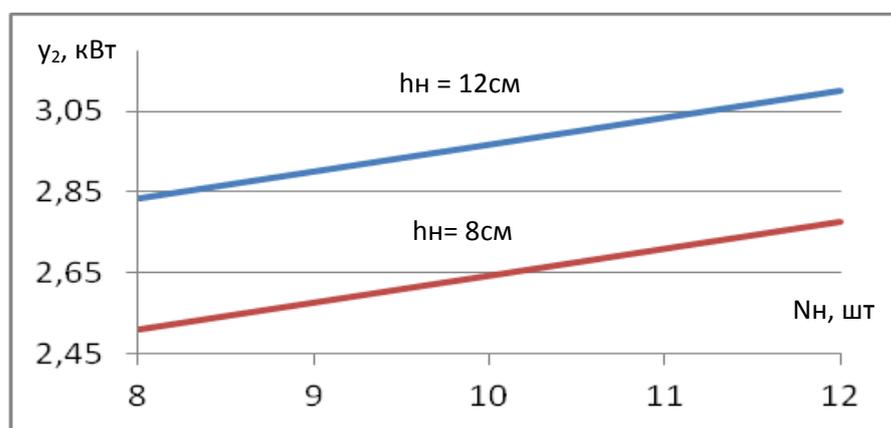


Рисунок 4.11 – Зависимости потребляемой мощности от количества зубьев при различной длине зубьев

#### 4.3.4 Сравнительные исследования теоретической (компьютерной) и экспериментальной моделей

В таблице 4.9 представлены значения полноты очистки ( $y_1$ ), рассчитанные по теоретической и экспериментальной (регрессионной) моделям.

Таблица 4.9 – Сравнительные исследования

$N_n$ , шт.	$h_n$ , см	$y_1^{\text{эксп.}}$ , %	$y_1^{\text{теор.}}$ , %
8	8	74,267	74,835
12	8	78,4	78,4
8	12	79,333	79,301
12	12	83,467	82,566
8	10	76,8	77,315
12	10	80,933	80,729
10	8	76,333	76,565
10	12	81,4	80,882
10	10	78,867	78,97

Сравнение проходило по следующим показателям:

- средняя ошибка

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_{теор} - y_{эксп}|}{y_{теор}} \cdot 100\% = 0,45\%$$

- максимальная ошибка

$$e_{\max} = \max \left( \frac{|y_{теор} - y_{эксп}|}{y_{теор}} \cdot 100\% \right) = 1,31\%$$

- коэффициент детерминации

Таким образом, максимальное расхождение в расчетных данных по моделям не превышает 1,5%.

В таблице 4.10 представлены значения потребляемой мощности ( $y_2$ ), рассчитанные по теоретической и экспериментальной (регрессионной) моделям.

Таблица 4.10 – Сравнительные исследования

Нн, шт.	hн, см	$y_2^{эксп.}, \%$	$y_2^{теор.}, \%$
8	8	2,5044	2,507
12	8	2,7711	2,7835
8	12	2,8284	2,799
12	12	3,0951	3,1055
8	10	2,6664	2,667
12	10	2,9331	2,9585
10	8	2,6378	2,6296
10	12	2,9618	2,9366
10	10	2,7998	2,7971

Сравнение проходило по следующим показателям:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_{теор} - y_{эксн}|}{y_{теор}} \cdot 100\% = 0,43\% \quad \text{- средняя ошибка}$$

- максимальная ошибка

$$e_{\max} = \max \left( \frac{|y_{теор} - y_{эксн}|}{y_{теор}} \cdot 100\% \right) = 1,26\%$$

- коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{теор} - y_{эксн})^2}{\sum (y_{теор} - \bar{y}_{теор})^2} = 0,98$$

Таким образом, максимальное расхождение в расчетных данных по моделям не превышает 1,5%.

#### 4.3.5 Экспериментальная оптимизация параметров зубьев шнекового рабочего органа

Проведем многоцелевую оптимизацию, в которой необходимо определить оптимальные значения числа ножей (могут принимать только целые значения) и длины ножей, обеспечивающие максимальную полноту очистки с минимальными энергозатратами, при этом потребляемая мощность не должна превышать 3 кВт, т.е. решить задачу:

$$y_1 = 55,87 + 1,034x_1 + 1,2667x_2 \rightarrow \max \quad y_2 = 1,32 + 0,067x_1 + 0,081x_2 \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} 1,32 + 0,067x_1 + 0,081x_2 \leq 3 \\ 8 \leq x_1 \leq 12 \\ 8 \leq x_2 \leq 12 \end{cases}$$

$x_1, x_2 \geq 0$ ;  $x_1 \in \text{—целое}$  при условиях:

$$(A) \quad Y(x) = \begin{pmatrix} y_1(x) \\ y_2(-x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1(x) = 55,87 + 1,034x_1 + 1,267x_2 \\ y_2(x) = y_2(-x) = 1,32 - 0,067x_1 - 0,081x_2 \end{pmatrix} \rightarrow \max$$

Многоцелевую оптимизацию выполним методом идеальной точки. Данный метод предполагает поиск решения из множества Парето, для которого значе-

ния критериев как можно меньше отклоняются от своих оптимальных значений.

Сформулируем задачу:

$$g(x) = \begin{cases} 1,32 + 0,067x_1 + 0,081x_2 \leq 3 \\ 8 \leq x_1 \leq 12 \\ 8 \leq x_2 \leq 12 \end{cases}$$

$$x_1, x_2 \geq 0; \quad x_1 \in \mathbb{Z} \text{ — целое}$$

при условиях:

Метод идеальной точки предполагает переход от задачи (А) к задаче (Б):

$$(Б) \quad p(Y(x), U) \rightarrow \min$$

$$p(Y(x), U) = \sqrt{(y_1(x) - y_1(x^{(1)}))^2 + (y_2(x) - y_2(x^{(2)}))^2}$$

где  $p(Y(x), U)$  - расстояние от точки утопии до идеальной точки

$$U = \begin{pmatrix} y_1(x^{(1)}) \\ y_2(x^{(2)}) \end{pmatrix} \text{ — точка утопии}$$

$x^{(1)}$  - оптимальное решение задачи  $y_1(x) \rightarrow \max$  при условиях  $g(x)$

$x^{(2)}$  - оптимальное решение задачи  $y_2(x) \rightarrow \max$  при условиях  $g(x)$

Решая задачу линейного программирования:

$$y_1(x) = 55,87 + 1,034x_1 + 1,267x_2 \rightarrow \max$$

при условиях

$$\begin{cases} 1,32 + 0,067x_1 + 0,081x_2 \leq 3 \\ 8 \leq x_1 \leq 12 \\ 8 \leq x_2 \leq 12 \end{cases}$$

$$x_1, x_2 \geq 0; \quad x_1 \in \mathbb{Z} \text{ — целое}$$

определим, что максимум функции  $y_1(x) = 55,87 + 1,034x_1 + 1,267x_2$  достигается в точке  $x^{(1)} = (11; 11,68)$

Решая задачу линейного программирования:

$$y_2(x) = 1,32 - 0,067x_1 - 0,081x_2 \rightarrow \max$$

при условиях

$$\begin{cases} 1,32 + 0,067x_1 + 0,081x_2 \leq 3 \\ 8 \leq x_1 \leq 12 \\ 8 \leq x_2 \leq 12 \\ x_1, x_2 \geq 0; \quad x_1 \in \text{—целое} \end{cases}$$

определим, что максимум функции  $y_2(x) = 1,32 - 0,067x_1 - 0,081x_2$  достигается в точке  $x^{(2)} = (8; 8)$ .

Таким образом, точка утопии:

$$U = \begin{pmatrix} y_1(x^{(1)}) \\ y_2(x^{(2)}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1(11; 1,68) \\ y_2(8; 8) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 82,04 \\ 2,502 \end{pmatrix}$$

Численно решая, при помощи надстройки «Поиск решения» в Excel, задачу:

$$p(Y(x), U) = \sqrt{(y_1(x) - 82,04)^2 + (y_2(x) - 2,502)^2} \rightarrow \min$$

найдем оптимальные значения факторов:

количество ножей -  $x_1 = 11$  шт;

длина ножей -  $x_2 = 11,5$  см.

При этом обеспечивается полнота очистки 82%. На основании теоретических (компьютерных) моделей установлено: оптимальное количество ножей составляет 8...12 шт., оптимальная величина выступа ножей составляет 9...12 см. В результате эффективность очистки составляет больше 80%, а затрачиваемая мощность при этом менее 3 кВт.

#### 4.4 Выводы

1. В результате статистической обработки осциллограмм давления рабочей жидкости в гидромоторе привода шнека при различном количестве и высоте стержневых зубьев получены зависимости давления рабочей жидкости от количества и высоты зубьев. Установлено, что при четырех зубьях среднее давление составляет 3,3 МПа, при шести зубьях 4,1 МПа, при восьми зубьях 5,3

МПа, однако при увеличении количества зубьев амплитуда колебаний давления уменьшается.

2. Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении опытов по методу полнофакторного эксперимента показал, что более значимое влияние на потребляемую мощность оказывает изменение длины выступа зубьев (коэффициент при  $x_2$  больше коэффициента при  $x_1$ ,  $0,081 > 0,067$ ), менее сильное – изменение их количества; при этом с увеличением, как количества зубьев, так и их длины потребляемая мощность повышается (оба коэффициента положительные).

3. Поверхность отклика целевой функции  $y_2$  близка к поверхности параболы цилиндра, но в выбранной области значений факторов имеет незначительную кривизну, о чем свидетельствует незначимость коэффициентов  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  и может быть аппроксимирована плоскостью.

## 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГРУНТОМЕТА ПОЛОСОПРОКЛАДЫВАТЕЛЯ С ГИДРОПРИВОДОМ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

### 5.1 Техничко-экономические показатели опытного образца ЛГП

Для определения исходных данных для расчета экономической эффективности экспериментального образца ЛГП были проведены производственные испытания в учебно-опытном лесхозе ВГЛТУ (рисунок 5.1). При проведении полевых испытаний производился хронометраж рабочих процессов, определялась скорость движения трактора и качественные показатели прокладки противопожарных работ. Результаты испытаний и исходные данные для расчета экономической эффективности представлены в таблице А1 (Приложение А).

В процессе испытаний установлено, что часовая производительность ЛГП составила 2,2 пог. км/ч, тогда как часовая производительность полосопрокладывателя ПФ-1 равна 1,6 пог. км/ч. При этом часовой расход топлива остался на прежнем уровне 14,9 кг, т.к. снизились энергозатраты фрезераторов, которые в предлагаемом варианте не фрезеруют задернелую почву, т.к. установлены над дном борозды сферических дисков с гидроприводом для предварительной подготовки почвы.

В качестве исходных данных для расчета экономической эффективности экспериментального образца ЛГП приняты цена нового агрегата 160 000 руб., против 120 000 руб. базового варианта. Повышение стоимости объясняется применением дорогостоящих гидроагрегатов.

Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении испытаний лесопожарного агрегата в производственных условиях подтвердили результаты теоретических исследований и полевых экспериментальных исследований лабораторной установки по методу полнофакторного эксперимента.



а)



б)

а – лесопожарный грунтomet-полосопрокладыватель с гидроприводом шнековых рабочих органов; б – лабораторная установка с гидроприводом шнековых рабочих органов

Рисунок 5.1 – Полевые испытания опытного образца ЛГП в агрегате с трактором Т-150К

При проведении полевых испытаний производился хронометраж рабочих процессов, определялась скорость движения трактора и качественные показатели прокладки противопожарных работ. На лабораторной установке смонтированы две секции шнековых рабочих органов, одна из которых с рыхлящими зубьями (левая секция), а другая без зубьев (правая секция) (рисунок 5.1 б). Проводились сравнительные исследования качественных и энергетических показателей. Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении опытов по методу полнофакторного эксперимента подтвердили результаты теоретических исследований.

## 5.2 Методика расчета технико – экономических показателей

Методика расчета технико – экономических показателей ЛГП принималась с учетом научных разработок ученых ВНИИЛМа по обоснованию технико-экономической эффективности лесопожарной техники [84], а также типовых методик экономических расчетов проектируемых машин лесного комплекса [108]. За базовую модель, с которым производилось сравнение экономических показателей, был принят серийный фрезерный полосопрокладыватель ПФ-1 с фрезерными рабочими органами для поперечного фрезерования и метания грунта. Общая ширина противопожарной полосы, создаваемой полосопрокладывателем ПФ-1 составляет 8...10 м. Агрегатируется полосопрокладывателем ПФ-1 с тракторами тягового класса 30 кН с приводом от ВОМ трактора. Крутящий момент от ВОМ трактора передается через карданный вал, звездочки, цепную передачу и фрикционные предохранительные муфты на фрезы-метатели с откидными ножами. Сменная производительность базовой модели около 12,8 пог. км/см. Низкая производительность базовой модели объясняется тем, что фрезы обрабатывают задернелый слой почвы на пониженной скорости трактора. Кроме того, механический привод фрез-метателей не обеспечивает надежное предохранение рабочих органов от поломок при встрече с препятствиями.

Повышение технико – экономических показателей опытного образца ЛГП с гидроприводом шнековых рабочих органов достигнуто за счет применения гидропривода шнековых рабочих органов и комбинированного предохранительного устройства, включающего в себя предохранительные клапаны гидромотора и рычажно-пружинное предохранительную пружину. Поэтому уменьшилось время простоев из-за повышения надежности машины, т.к. при преодолении препятствий рабочие органы предохраняются от поломок за счет срабатывания предохранительных клапанов гидромотора. Кроме того, шнековые рабочие органы очищают полосу от задернелого напочвенного покрова, поэтому сферические диски лучше заглубляются в почву и создают более качественный почвенный вал перед фрезами-метателями, при этом увеличивается толщина слоя грунта до 6-8 см на противопожарной полосе шириной до 10 м, достаточной для заграждения и тушения лесного низового пожара.

Общая стоимость базовой модели и нового сконструированной модели отличается на 40 000 рублей по состоянию цен на 2022 год, но при этом производительность выше на 37% и составляет 2,2 погонных км/ч. При одинаковой годовой загрузке агрегатов в 480 часов опытным образцом увеличивается общая прокладка минерализованных противопожарных полос на 288 пог. км. За счет повышения надежности конструкции ЛГП с гидроприводом рабочих органов снизились показатели на ТО и ремонт опытного образца.

Экономический эффект для внедрения опытного образца был достигнут благодаря повышению производительности выполняемого процесса прокладки противопожарных минерализованных полос, за счет улучшения конструкции и механизма грунтомета – полосопрокладывателя, снабженного шнековыми рабочими органами с рыхлящими зубьями для удаления горючих материалов из потока грунта.

Как показывает экономический расчет (таблица А2. Приложение А), применение нового грунтомета – полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов для прокладки противопожарных полос позволяет повысить производительность орудия: часовая – на 3,81 пог. км; сменная – на 30,4

пог. км; годовая – на 1824,0 пог. км. Экономический эффект от применения нового грунтомета – полозопрокладывателя составил 312445,73 рублей при сроке окупаемости 0,53 года. Расширенный экономический расчет представлен в Приложении А.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При анализе проведенных исследований рабочих процессов технических средств для прокладки противопожарных полос установлено, что высокоэффективными являются агрегаты с активными рабочими органами, однако они не имеют рабочих органов для предварительного удаления горючих растительных материалов из потока грунта. Повышение эффективности работы лесопожарных машин возможно при применении шнековых рабочих для удаления напочвенного покрова.

2. Обоснована новая конструкция лесопожарного грунтомета – полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов, которая решает задачу повышения эффективности работы, за счет улучшения качества рыхления и удаления горючих растительных материалов из потока грунта и предохранения шнека от перегрузок при преодолении препятствий.

3. На основе разработанной имитационной модели лесопожарной грунтометательной машины со шнековым рабочим органом с применением метода динамики частиц исследовано влияние основных параметров рабочего органа на эффективность очистки рабочей полосы от напочвенного покрова с помощью программы для ЭВМ (Свидетельство о регистрации № RU 2021663167, 12.08.2021).

4. Для обеспечения условия сплошности сдвига напочвенного покрова частота вращения шнекового барабана изменялась обратно пропорционально шагу винта  $s$  и составляла 7,2 об/с для  $s = 16$  см; 3,5 об/с для  $s = 33$  см; 1,8 об/с для  $s = 66$  см. Оптимальные диапазоны количества рыхлящих зубьев и величины их выступа над винтовой поверхностью шнека составляют 12 и 11 см соответственно и обеспечивают полноту очистки от напочвенного покрова более 80 % при потребляемой барабаном мощности менее 12 кВт. Оптимальная частота вращения рабочего органа составляет около 5 об/с. При этом достигается полнота очистки более 0,89. Оптимальные диапазоны количества зубьев и величин

ны выступа зубьев составляют 12 и 11 см соответственно и обеспечивают полноту очистки от напочвенного покрова более 80 %.

5. В результате проведения виртуального эксперимента установлено, что при частоте вращения 300 об/мин и преодолении высоты препятствия 50 мм минимальное среднее значение крутящего момента гидромотора составляет 1000 Н·м, а максимальное значение 1100 Н·м. При частоте вращения 400 об/мин и преодолении высоты препятствия 100 мм минимальное среднее значение крутящего момента составляет 1400 Н·м, а максимальное значение 1480 Н·м. Максимальное среднее значение тягового сопротивления 7279,79 Н наблюдается при преодолении препятствия высотой 100 мм и частоте вращения рабочего органа 400 об/мин, максимальное среднее значение силы на предохранительной пружине равно 8308,48 Н, вертикальная сила на предохранительной пружине составляет 8308,48 Н.

6. Разработан лабораторный образец грунтомета–полосопрокладывателя и проведены полевые испытания. В результате статистической обработки осциллограмм давления рабочей жидкости в гидромоторе привода шнека при различном количестве и длине зубьев установлено, что при четырех зубьях среднее давление составляет 3,3 МПа, при шести зубьях 4,1 МПа, при восьми зубьях 5,3 МПа. Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении опытов по методу полнофакторного эксперимента подтвердили результаты теоретических исследований. Годовой экономический эффект от внедрения экспериментального образца грунтомета–полосопрокладывателя со шнековыми рабочими органами для удаления горючих растительных остатков из потока метаемого грунта составляет 312445,73 руб.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин [Текст]/ В.А. Александров. – М.: Экология,1995. –257с.
2. Аткина Л.И. Особенности накопления подстилок в лесных сообществах [Текст]/Л.И. Аткина, А.С. Аткин //Почвоведение. –2000. –№8. –С.1004–1008.
3. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей / Я. С. Агейкин. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.
4. Агейкин Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет / Я. С. Агейкин. – Москва: Машиностроение, 1972. – 184 с.
5. Бартенев И. М. Природоохранные технологии лесопользования и лесовосстановления / И. М. Бартенев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Т. 2. № 3-4 (8-4), 2014. с. 121-126.
6. Бартенев И.М. Комбинированный лесопожарный грунтомет и рекомендации по его применению [Текст] / И.М. Бартенев, М.В. Драпалюк, П.Э. Гончаров, М.А. Гнусов, А.А. Тамби, В.Е. Клубничкин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 174-184.
7. Бабуркин П.О., Комаров П.В., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Моделирование процесса гелеобразования в цистеин-серебряном растворе методом диссипативной динамики частиц // Коллоидный журнал. – 2015. – Т. 77. – № 5. – С. 572-581.
8. Бартенев И. М. К вопросу о тушении лесных пожаров грунтом [Текст] / И. М. Бартенев, Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 4 (8). – С. 97-101.
9. Бартенев И. М. Энергосберегающие и природосберегающие технологии в лесном комплексе [Текст]: учеб. пособие / И. М. Бартенев. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. – 107 с.

10. Бартенев И.М. Особенности численного интегрирования системы дифференциальных уравнений рабочего процесса почвообрабатывающей машины с гидроприводом для профилактики и тушения лесных пожаров [Текст] / И. М. Бартенев, П. И. Попиков, А. В. Шаров, Н. А. Шерстюков // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 170-176.

11. Батин С.Ю. Метод и результаты количественной оценки вертикального перемещения слоев почвы при обработке машинами фрезерного типа // Молодежь и научно-технический прогресс. Красноярск, 1990. Ч. 2. С. 86–88.

12. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Численное моделирование сложных задач аэрогазодинамики методом “крупных частиц” // Ученые записки ЦАГИ. – 1977. – Т. 8. – № 3. – С. 1-18.

13. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.

14. Беликов Е. В. Оптимизация параметров машины для удаления пней на основе компьютерного моделирования [Текст] / Е. В. Беликов // Вестник КрасГАУ. – 2009. – №. 8. – С. 7-12.

15. Богуславский И. В. Научно-методологические основы проектирования приводов технологических машин / И. В. Богуславский, А. Т. Рыбак, В. А. Чернавский. – Ростов-на-Дону: Институт управления и инноваций авиационной промышленности, 2010. – 276 с.

16. Борозна, Т. В. Якушева, В. Н. Язов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Т. 2. № 5-4 (10-4), 2014. с. 38-41.

17. Bell B.J., Opperman C., Whittome C. Ploughs and Ploughing Techniques. London: Farming Press Productions, 2002. 131 p.

18. Bartenev I.M. Study of efficiency of soil-thrower and fire-break major on the basis of mathematic simulation / I.M. Bartenev, S.V. Malyukov, M.A. Gnusov and D.S. Stupnikov // International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET) Scopus Indexed. – 2018. Volume:9, Issue: 4, Pag-es:1008-1018.

19. Bartenev I.M. Research and development of the method of soil formation

and delivery in the form of a concentrated flow to the edge of moving ground forest fire / I.M. Bartenev, P.I. Popikov, S.V. Malyukov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)». – 2019. – no. 226 (1) 012052. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052 статистика, 2004. – 656 с.

20. Bartenev I.M. et al. Comparative studies of physical models of soil implemented by the method of discrete elements (DEM) on the example of a simple loosening tillage tool Comparative studies of physical models of soil implemented by the method of discrete elements (DEM) o // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 392. P. 012050.

21. Bertoldo S. Safety in forest fire fighting action: A new radiometric model to evaluate the safety distance for firemen working with hand-operated systems (Conference Paper) [Текст] / S. Bertoldo, L. Corgnati, A. Losso, G. Perona // 3rd International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires 2012, FIVA 2012, New Forest, United Kingdom. – 2012. – Vol. 158. – P. 3-12.

22. Böttcher S. Eine allgemeine Analyse der Aufwärtsforderngeines Einzelkorpers in Schnecken förder ernbeliebiger Neigung. "VDJ Zeitschrift", 1963 № 14, 16 und "VDJ-Zeitschrift", 1964 № 18.

23. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Изд-во "Наука", 1969. – 576 с.

24. Vario J. Simulating soil deformation using a critical-state model [Text] / J. Vario // Europ. J. Soil. Sc. – 1997. – Vol. 48, N. 1. – P. 59–70.

25. V.I. Nikitin, M.S. Metalnikov, V.D. Braslavsky, V.A. Martynenko 1972 «Soil gun» USSR Patent RF no. SU 340742 A1.

26. Гутер Р.С., Янпольский А.Р. Дифференциальные уравнения: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1976. 304 с.

27. Гнусов М. А., Попиков П. И., Малюков С. В., Шерстюков Н. А., Поздняков А. К. - 2020. / Повышение эффективности предупреждения и тушения лесных пожаров с помощью лесопожарной машины. // В Серии конференций

ЮР: Материаловедение и инженерия (Том 919, № 3, стр. 032025). Издательство ВГД.

28. Григорьев Ю.Н., Вшивков В.А., Федорук М.П. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.

29. Германова, Н.И. Разложение опада как показатель интенсивности круговорота элементов в лесных насаждениях Южной Карелии [Текст] / Н.И. Германова // Лесоведение. – 2000. – № 3. – С.30–35.

30. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

31. Гнусов М. А. Почвообрабатывающие орудия для прокладки минерализованных полос, канав, противопожарных дорог и разрывов [Текст] / М. А. Гнусов; науч. рук. М. В. Драпалюк // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб-к науч. трудов по мат-лам междунар. заочной науч.-практ. конференции / гл. ред. В. М. Бугаков; Фед. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования. – Воронеж, 2013. – № 4 (4). – С. 272-276.

32. Гнусов М. А. Обоснование параметров комбинированных рабочих органов грунтомета для прокладки минерализованных полос в лесу [Текст]: дис ... канд. тех. наук / М. А. Гнутов. – Воронеж, 2014. – 140 с.

33. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст]: учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

34. Григорьев И. В. Сравнительный анализ противопожарных систем защиты лесных машин [Текст] / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева, С. А. Войнаш // Строительные и дорожные машины.– М.: СДМ-пресс. – 2019. – № 1. – С. 45-49.

35. Грунтомет лесопожарный тракторный ГТ-3 [Текст]: учеб. пособие / Е. С. Воронина, Ю. М. Кодяков, Г. Е. Фомин [и др.]. – Ленинград, 1981. – 40 с.

36. Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике /Х. Гулд, Я. Тобочник. – Ч. 2. – М.: Мир, 1990. – 400 с.
37. Gao K. T. Fore casting forest fire risk grade of forest sub-compartment (Article) [Текст] / К. Т. Gao, Р. J. Liu, Х. М. Tang // Research Institute of Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China. – 2013. – Vol. 35. – P. 61-66.
38. Драпалюк М.В. Результаты имитационного моделирования рабочего процесса ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины. Драпалюк М.В., Петков А.Ф., Поздняков А.К. Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12. № 2 (46). С. 89-99.
39. Драпалюк М. В. Повышение эффективности рабочего процесса лесопожарной грунтометательной машины с гидроприводом ротора [Текст] / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Д. С. Ступников, А. В. Шаров, Н. А. Шерстюков // Лесотехнический журнал. – 2019. – № 1(33). – С. 147-152.
40. Драпалюк М. В. Обоснование основных параметров машины для профилактики и тушения лесных пожаров с гидроприводом рабочих органов [Текст] / М. В. Драпалюк, Д. С. Ступников, А. В. Шаров // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 7 (43). – С. 53-56.
41. Драпалюк М.В. Обоснование параметров лесного грунтомета с комбинированными рабочими органами / М.В. Драпалюк, П.И. Попиков, П.Э. Гончаров, М.А. Гнусов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 77-81.
42. Драпалюк М. В. Математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров [Текст] / М. В. Драпалюк, И. М. Бартенев, М. А. Гнусов, Д. Ю. Дручинин и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 232-246.

43. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст]: в 2 кн. Книга 2 / Н. Дрейпер, Г. Смит. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 351 с.

44. Донато И.О. Роторно – винтовые машины. Основы теории движения [Текст]/И.О. Донато [и др.]–Н. Новгород: НПК,2000. – 451с.

45. Есков Д. В. Грунтометательная машина и технология для борьбы с лесными пожарами / Д. В. Есков, Е. В. Внуков, В. С. Ескова [Текст] // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 4 (40). – С. 155-159.

46. Есков Д. В. Технология и машина для предупреждения и ликвидации лесных пожаров в условиях среднего и нижнего Поволжья / Д. В. Есков, Е. В. Внуков, В. С. Ескова [Текст] // Научно-практические пути повышения экологической устойчивости и социально-экономическое обеспечение сельскохозяйственного производства: мат – лы междунар. науч. – практ. конф., посвящённой году экологии в России / сост. Н. А. Щербакова, А. П. Селиверстова. – 2017. – С. 137-140.

47. Есков Д. В. Комбинированные мобильные машины для борьбы с лесными пожарами / Д. В. Есков, Е. В. Внуков, В. С. Ескова [Текст] // Научно-практические пути повышения экологической устойчивости и социально-экономическое обеспечение сельскохозяйственного производства: мат-лы междунар. науч. – практ. конф., посвящённой году экологии в России / сост. Н. А. Щербакова, А. П. Селиверстова. – 2017. – С. 164-170.

48. Ермичев В. А. Влияние уплотнения лесных почв на их лесорастительные свойства / В. А. Ермичев, В. Н. Лобанов, Г. Н. Кривченкова, А. В. Артемов // Актуальные проблемы лесного комплекса. № 21, 2008. с. 206-209.

49. Ervin E. Weatherly, Robert K. Willms 1992 US «Forest fire extinguishing apparatus» Pat. no. US5214867A.

50. Zubova S.P. Asymptotic Solution of the Cauchy Problem for a First-Order Equation with a Small Parameter in a Banach Space. The Regular Case / Zubova S.P., Uskov V.I. // Mathematical Notes, 2018, Vol. 103, No. 3, pp. 395-404.

51. Инженерные расчеты на ЭВМ: справ. пособие / подред. В. А. Троицкого. – Л.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

52. Игнатов С.Д., Шерстнев Н.С. Математическая модель рабочего процесса дорожной фрезы при разрушении асфальтобетона. Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". 2015;(4(44)):120-125.

53. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Основы математического анализа: учеб. М.: Наука. Ч. 1. 1971. 600 с. Ч. 2. 1973. 448 с.

54. Improving the efficiency of forest fire prevention and suppression with of forest fire machine Gnusov M.A., Popikov P.I., Malyukov S.V., Sherstyukov N.A., Pozdnyakov A.K. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 32025.

55. Impact of Bulk Seed Handing on Soybean Germination Rate Dr. Matt Darr, Iowa State University; Agricultural & Biosystems Engineering – Mr Ben Rethmelm, Bridgestone Firestone North America Tire, LLC- Mr. Randall Reederm the Ohio State University, Food, Agricultural & Biological Eng.- Bridgestone, 2010.-pp.56-58.

56. Коршунов Н.А. Метод оценки обеспеченности лесопожарных формирований силами пожаротушения/ Н.А. Коршунов, Р.В. Котельников, В.А. Савченкова //Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 3 (31). С. 71-78.

57. Коротких В. Н. Динамика гидропривода рабочего органа лесного дискового плуга [Текст] / В. Н. Коротких, Р. М. Дочкина, С. А. Балобанов // Лес. Наука. Молодежь - 2008: сборник материалов по итогам научно-исследовательской работы молодых ученых ВГЛТА за 2007-2008 гг. - Воронеж, 2008. – С. 100-103. – Библиогр.: с. 103

58. Кручек А. Д. Орудия для создания и подновления противопожарных минерализованных полос [Текст]: обзорн. информ. / А. Д. Кручек, О. В. Зубков, З. А. Чупрова. – М.: ВНИИЦ лесресурс Госкомитета СССР, 1991. – 24 с.

59. Корниенко П.П., Сериков Ю.М., Зинин В.Ф., Казаков В.И. Механизация обработки почвы под лесные культуры. М.: Агропромиздат, 1987. 247 с.

60. Коршун В.Н., Карнаухов А.И., Кухар И.В. Метод анализа технологических машин для лесного хозяйства // Системы. Методы. Технологии. № 2(30). 2016. С. 163–169.

61. Кураев В.Н., Шестакова В.А. Изменение свойств почв при различных способах подготовки их к лесным культурам // Лесоведение. 1970. № 1. С. 75–82.

62. Кухар И.В. Роторная машина для послойной обработки почв // Экологическое образование и природопользование в инновационном развитии региона: сб. ст. по материалам межрегион. науч. – практ. конф. школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых (Красноярск, 19 февр. 2014 г.). Т. I. Красноярск: СибГТУ, 2014. С. 80–81.

63. Коршун В.Н. Основные физико-механические и технологические свойства опавших листьев [Текст] / В.Н. Коршун // Машины и орудия для механизации лесозаготовок и лесного хозяйства: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТА, 1984. – С. 50–52.

64. Коршун В.Н. Моделирование движения агрегата по вырубке [Текст] / В.Н. Коршун // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров и систем управления лесного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГЛТА, 2002. – Вып. 7, ч. 1. – С. 61–64.

65. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Хорольский Н.А. Прочностные исследования твердотельных моделей почвообрабатывающих рабочих органов // Актуальные Направления Научных Исследований XXI Века Теория И Практика. 2014. Vol. 2, № 5-2 (10-2). P. 188–191.

66. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Захаров П.В. Использование сапр для обоснования конструктивных и прочностных параметров почвообрабатывающих орудий. // Современные Проблемы Науки И Образования. 2013. № 4. P. 25.

67. Лысыч М.Н. Определение поперечной устойчивости лесохозяйственного почвообрабатывающего МТА на виртуальном стенде // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества - взгляд в

будущее сборник статей II Международной научно-технической конференции “Минские научные чтения - 2019.” 2020. Р. 130–134.

68. Лысыч М. Н. Моделирование процесса метания грунта лесопожарным грунтометом в среде САЕ [Текст] / М. Н. Лысыч, М. Н. Шабанов, А. Г. Князев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2017. – Т. 5, № 7-2 (33-2). – С. 117-120.

69. Lysych M.N. A study of the static lateral stability of tillage machine-tractor unit on a virtual stand // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1515, № 4.

70. Lysych M.N. Computer simulation of the process soil treatment by tillage tools of soil processing machines // Comput. Res. Model. 2020. Vol. 12, № 3. P. 607–627.

71. Малюков С. В. Истоки зарождения грунтометательных машин / С. В. Малюков, Д. С. Ступников // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – № 4 (26). – С. 83-96.

72. Малюков С. В. Многофакторная оптимизация параметров фрезерного рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины [Текст] / С. В. Малюков, Д. С. Ступников, А. В. Шаров, А. С. Ступников // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 3 (35). – С. 172-179.

73. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст]: учеб. пособие / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

74. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления: учебник для вузов / под ред. А. Б. Лурье. – Л.: Колос. Ленингр. отделение, 1979. – 312 с.

75. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей / А. Д. Мышкис. – 3-е изд., испр. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.

76. Муратов А.Р., Муратов О.А. “Система машин и технологий для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 2011-2016 гг.” часть III. Мелиорация. ТИМИ қошидаги ИСМИТИ 2015. Тошкент ш. 2015 йил.

137 бет. 1. Горячкин В.П. Собрание сочинений. В 3 т. Т. 2 / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – 459 с.

77. Малюков С.В. Машина для тушения пожаров грунтом [Текст] / С.В. Малюков // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно практической конференции Воронежский государственный технический университет. – 2014. – Ч. 7.

78. Московский М.Н. Изучение свойств СВМПЭ при изготовлении на их основе рабочих органов почвообрабатывающих машин // Инженерный вестник Дона, 2014, №1 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2265](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2014/2265).

79. Московский М.Н., Бутовченко А.В. Сравнительная оценка основных макро и микроповреждений семян ячменя, при очистке на решетных модулях, изготовленных из листового металла и из материала СВМПЭ // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1584](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1584).

80. Нартов П.С. Дисковые почвообрабатывающие орудия. Изд-во ВГУ. Воронеж. 1972. Стр. 184.

81. Невзорова М. Ю. Проектирование гидравлического привода машин и механизмов с применением частичного синтеза [Текст] / М. Ю. Невзорова, А. Т. Рыбак // Инновационные технологии в науке и образовании: сб-к трудам VI междунар. науч. – практич. конф. / редкол. Ю. Ф. Лачуга [и др.]. – 2018. – С. 250-254.

82. Никольский С.М. Линейные уравнения в линейных нормированных пространствах // Изв. АН СССР. Сер. матем. – 1943. – Т. 7, вып. 3. – С. 147-166.

83. Обоснование параметров лесного грунтомета с комбинированными рабочими органами [Текст] / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, П. Э. Гончаров, М. А. Гнусов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2014. – Т. 2, № 2-2 (7-2). – С. 77-81.

84. Оценка состояния средств тушения лесных пожаров и экономической эффективности их применения Коршунов Н.А., Мартынюк А.А., Савченкова В.А., Калинин М.С. Лесохозяйственная информация. 2019. № 1. С. 77-88.

85. Орловский С.Н. Проектирование машин и оборудования для садово-паркового и ландшафтного строительства: учеб. пособие. Красноярск: СибГТУ, 2004. 108 с.

86. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров и режимов работы роторных рабочих органов // Лесн. журн. 2012. № 4. С. 70–76. (Изв. высш. учеб. заведений).

87. Орловский С.Н., Кухар И.В. Технология послойного фрезерования почв при их обработке под лесные культуры и орудие для ее выполнения // Сиб. лесн. журн. 2017. № 3. С. 74.

88. Orlovsky S.N. Opredelenie energeticheskikh i dinamicheskikh parametrov traktorov, rezhimov rezaniya aktivnykh rabochikh organov mashinno – traktornykh agregatov [Characterization of Tractor Energy and Dynamic Parameters, Cutting Conditions of active tractor aggregates executive devices]. Krasnoyarsk, 2011. 376 p.

89. Питухин А. В. Минимизация техногенного воздействия на лесную среду в процессе лесозаготовок / А. В. Питухин, В. С. Сюнев // Фундаментальные исследования. № 9, 2005. с. 116-120.

90. Патент № 2616021 Российская Федерация, МПК E02 F 3/18. Пожарный грунтомет – полосопрокладыватель: № 2014103123/03; заявл. 29.01.2014; опубл. 20.02.2015 / М.В. Драпалюк, П.Э. Гончаров, Д.С. Ступников, А.В. Шаров; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова».

91. Патент № 2541987 Российская Федерация, МПК E02 F 3/18. Пожарный грунтомет – полосопрокладыватель: № 2016104672; заявл. 11.02.2016; опубл. 11.04.2017 / И.М. Бартнев, З.К. Емтыль., М.В. Драпалюк, Л.Д. Бухтояров, П.И. Попиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова».

92. Патент № 2762160 Российская Федерация, МПК А 62 С 27/00, А 62 С 3/02. Лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель [Текст] / П. И. Попиков, И. М. Бартнев, А. К. Поздняков, М. Н. Лысыч, В. П. Попиков, А. Ф. Петков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – № 2021117044; заявл. 10.06.2021; опубл. 16.12.2021, Бюл. № 35.

93. Патент № 2762965 Российская Федерация, МПК А 62 С 27/00, А 62 С 3/02. Лесопожарная грунтометательная машина [Текст] / И. М. Бартенев, П. И. Попиков, А. Ф. Петков, А. К. Поздняков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – № 2021121717; заявл. 21.07.2021; опубл. 24.12.2021, Бюл. № 36.

94. Патент № 2684940 Российская Федерация, МПК Е 02 F 3/18 (2006.01) Е 02 F 5/00 (2006.01) А62С 3/02 (2006.01). Пожарный грунтомет-полосопрокладыватель [Текст] / И. М. Бартенев, П. И. Попиков, С. В. Малюков, С. В. Зимарин, Н. А. Шерстюков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – № 2018125062; заявл. 09.07.2018; опубл. 16.04.2019.

95. Патент № 196851 Российская Федерация, МПК А62С 27/00, Е02F 3/18. Лесопожарная грунтометательная машина с энергосберегающим гидроприводом [Текст] / П. И. Попиков, П. Э. Гончаров, Д.С. Ступников, А. В. Шаров; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – № 2019142070; заявл. 16.12.2019; опубл. 18.03.2020, Бюл. № 8. – 8 с.

96. Патент № 2541987 Российская Федерация, МПК Е 02F 3/18. Пожарный грунтомет – полосопрокладыватель [Текст] / Бартенев И. М., Емтыль З. К., Драпалюк М. В., Бухтояров Л. Д., Попиков П. И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – № 2014103123/03; заявл. 29.01.2014; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 1. – 8 с.

97. Патент № 2496540 Российская Федерация, МПК А62С 27/00. Пожарный грунтомет – полосопрокладыватель [Текст] / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, М. А. Гнусов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – № 2012126216/12; заявл. 22.06.2012; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30. – 6 с.

98. Попиков П.И., Попиков В.П., Шаров А.В., Петков А.Ф., Поздняков А.К. Влияние режимов работы лесопожарной грунтометательной машины с гидроприводом на показатели эффективности. Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 1 (37). С. 209-217.

99. Попиков П. И. Теоретические исследования рабочего процесса лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим приводом [Текст] / П. И. Попиков, П. Н. Щерблыкин, А. В. Шаров, Н. А. Шерстюков, Ю. В. Мирошников // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: мат – лы междунар. науч. – практич. конф. – Воронеж, 2018. – С. 151-156.

100. Попиков, П. И. Экспериментальные исследования энергосберегающего гидропривода противопожарного грунтомета [Текст] / П. И. Попиков, Д. С. Ступников, А. В. Шаров // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т.6, № 4 (40). – С. 378-382.

101. Попиков П.И. Математическая модель взаимодействия шнековых рабочих органов лесопожарных грунтометательных машин с напочвенным покровом //Попиков П.И., Поздняков А.К. Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 1 (41). С. 163-171.

102. Попиков П.И. Исследование влияния параметров шнекового барабана лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя на качество очистки потока грунта от напочвенного покрова /П.И. Попиков, А.К. Поздняков, М.А. Гнусов, А.Ф. Петков //Лесотехнический журнал. 2022. Т. 12. № 2 (46). С. 126-134.

103. Попиков П. И. Моделирование рабочего процесса лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим приводом [Текст] / П. И. Попиков, П. Н. Щерблыкин, А. В. Шаров // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5, № 4 (30). – С. 251-257.

104. Попиков П.И., Попиков В.П., Шаров А.В., Петков А.Ф., Поздняков А.К. Влияние режимов работы лесопожарной грунтометательной машины с гидроприводом на показатели эффективности. Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 1 (37). С. 209-217.

105. Попиков П.И., Поздняков А.К., Шаров А.В., Посметьев В.В., Попиков В.П. Программа для моделирования работы лесопожарной грунтометательной машины с гидроприводом активных рабочих органов. Свидетельство о

регистрации программы для ЭВМ 2021617923, 20.05.2021. Заявка № 2021616891 от 04.05.2021.

106. Попиков П.И., Поздняков А.К., Гнусов М.А., Посметьев В.В., Попиков В.П. Программа для моделирования процесса взаимодействия шнекового рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины с почвенно-растительной средой. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021663167, 12.08.2021. Заявка № 2021662214 от 02.08.2021.

107. Полухин В. А. Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких металлов / В. А. Полухин, В. Ф. Ухов, М. М. Дзугутов. – М.: Наука, 1981. – 323 с.

108. Попиков П.И., Поздняков А.К., Усков В.И., Лысыч М.Н., Гнусов М.А. Теоретическое исследование кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины. Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. № 3 (43). С. 140-151.

109. Поздняков А.К. Анализ кинематических и динамических параметров шнекового рабочего органа грунтомета полосопрокладывателя на виртуальном стенде. В сборнике: Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства. Сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 320-323.

110. Поздняков А.К. Имитационная модель очистки грунта от напочвенного покрова шнековым барабаном лесопожарного грунтомета- полосопрокладывателя поздняков а.к. в сборнике: повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2022. С. 155-156.

111. Попиков П.И., Поздняков А.К., Попиков В.П., Петков А.Ф. Оптимизация параметров шнековых рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины. В сборнике: Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2022. С. 161-162.

112. Поздняков А.К. Исследование кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа грунтометательной машины на виртуальном стенде. В сборнике: Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ. Сборник статей II Международной научно-технической конференции в рамках Международного молодежного форума по лесопромышленному образованию (Лес-Наука-Инновации-2022). Белорусский государственный технологический университет. Минск, 2022. С. 207-211.

113. Поздняков А.К. Обзор кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа грунтомета-полосопрокладывателя на виртуальном стенде в лесных условиях. В сборнике: Механика и машиностроение. Наука и практика. Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 111-112.

114. Поздняков А.К. Имитационная модель рабочего процесса шнекового барабана лесопожарного грунтомета полосопрокладывателя. В сборнике: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. материалы международной научно-практической конференции. Воронеж, 2022. С. 75-79.

115. Рубинская А. В. Технологические мероприятия по снижению техногенной нагрузки на окружающую среду при лесозаготовительном процессе / А. В. Рубинская, А. П. Мохирев, Н. В. Городецкая, Н. С. Кузьмик // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. № 116, 2016. с. 625-636.

116. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / под ред. Е. Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980. – 216 с.

117. Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст]: справ. руководство / Л. З. Румшицкий – М.: Наука, 1971. – 192 с.

118. Рыбак А. Т. Теоретические основы расчета системы управления гидравлического привода стенда для испытаний поршневых гидравлических цилиндров [Текст] / А. Т. Рыбак, И. К. Цыбрий, С. В. Носачёв, А. Р. Зенин // Вест-

ник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 242-249.

119. Рыбак А. Т. Совершенствование методики расчета системы приводов технологического оборудования / А. Т. Рыбак, И. В. Богуславский. // Вестник машиностроения. – 2010. – № 10. – С. 39-46.

120. Рыбак А. Т. Совершенствование научно-методологических основ проектирования систем приводов технологических машин / А. Т. Рыбак, И. В. Богуславский // Вестник Донского государственного технического университета. – Ростов-на-Дону, 2010. – Т. 10, № 2 (45) – С. 249-257.

121. Рыбак А. Т. Гидромеханические системы. Моделирование и расчёт: монография / А. Т. Рыбак. – Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ. – 2008. – 145 с.

122. Рыбак А. Т. Теоретические основы моделирования системы привода стенда для испытаний плунжерных гидроцилиндров [Текст] / А. Т. Рыбак, И. К. Цыбрий, С. В. Носачев, А. Ю. Пелипенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №3 (75). – С. 19-29.

123. Рыбак А. Т. Динамика синхронного гидромеханического привода мобильной технологической машины [Текст] / А. Т. Рыбак, А. Р. Темирканов, О. В. Ляхницкая // Стин. – 2018. – № 3. – С. 4-6.

124. Rybak A. T. Modeling and calculation of hydromechanical systems dynamics based on the volume rigidity theory / A. T. Rybak, M. P. Shishkarev, A. A. Demyanov, V. P. Zharov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 26. – P.01001.

125. Robert J. Vanahan 1987 US «Fire extinguishing apparatus» Pat. no. US4852656AUnitedStates.

126. Согин А. В. Средства гидромеханизации для очистки водных объектов от донных отложений: дисс. ... док. тех. наук / А.В. Согин. - М., 2011. 360 с.

127. Свиридов, Л. Т. Основы научных исследований [Текст]: учеб. пособие / Л. Т. Свиридов. – Воронеж: ВГЛТА, 2003. – 314 с.

128. Свиридов Л. Т. Основы научных исследований [Текст]: учеб. пособие / Л. Т. Свиридов, О. Н. Чередникова, А. И. Максименков. – Воронеж: ГОУ ВПО «ВГЛТА», 2011. – 108 с.

129. Синеоков Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.

130. Советов Б. Я. Моделирование систем: учеб. пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1998. – 319 с.

131. Справочник по прикладной статистике: в 2-х т.: пер. с англ./ под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю. Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистики, Т. 1: 1989. – 510 с.; Т. 2: 1990. – 526 с.

132. Ступников Д. С. Экономическое обоснование целесообразности использования лесопожарной грунтометательной машины для борьбы с лесными пожарами [Текст] / Д. С. Ступников // Resources and Technology. – 2017. – № 14 (1). – С. 1-8.

133. Ступников Д. С. Тенденции развития технических средств для тушения лесных пожаров [Текст] / Д.С. Ступников // Лесотехнический журнал. – 2016. – № 2 (22). – С. 135-140.

134. Ступников Д. С. Орудия для профилактики и тушения лесных пожаров [Текст] / Д. С. Ступников // Воронежский научно-технический вестник. – 2015. – № 2-2 (12). – С. 62-67.

135. Ступников Д. С. Виды лесных пожаров и методы их тушения [Текст] / Д. С. Ступников // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 9-3 (20-3). – С. 201-203.

136. Stepuk E. Hoisting Efficiency of Loose Materials by Means of Screw // XIV Meidzynarodowa konferencja student ckich kol naukowych. – Uniwersytet Przyrodniczy We Wroclawiu, 2009. - P. 187.

137. Труфляк И. С. Параметры и режимы работы режущего аппарата для уборки трав и зерновых культур / И. С. Труфляк // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе: материалы

Междунар. науч.-практ. конф. – Ставрополь: Ставропольский ГАУ, 2017. – С. 283–288.

138. Тарасов Е. А. Сравнительная оценка эффективности рекуперативных систем лесного почвообрабатывающего агрегата [Текст] / Е. А. Тарасов // Вестник московского государственного университета леса – лесной вестник. – 2007. – № 4. – С. 107-110.

139. Ушакова Г.И. Влияние экологических условий на скорость и характер разложения лесной подстилки [Текст] / Г.И. Ушакова // Почвоведение. – 2000. – № 8. – С. 1009–1015.

140. Фомин К.В., Крылов К.С., Харламов В.Е., Морозихина И.К. Михалочкина В.Н., определение плотности распределения момента сопротивления на рабочем органе шнекового профилировщика при выполнении технологической операции, труды Инсторфа, 2017, г.Тверь, с. 34-39.

141. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента / В. В. Федоров. – М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1971. – 312 с.

142. Федорченко И. С. Экспериментальное устройство для метания грунта [Текст] / И. С. Федорченко, Е. И. Максимов // Лесной и химический комплексы: проблемы и решения: сб-к ст. всерос. науч.-практич. конф. – Красноярск, 2009. – Т. II. – С. 234-239.

143. Федорченко И. С. Обоснование параметров рабочего органа грунтомета для выполнения работ в лесном хозяйстве [Текст]: дис. ... к-та. техн. наук / И. С. Федорченко. – С. 69-71.

144. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов / Д. Финни; пер. с англ. – М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1970. – 287 с.

145. Фокин С. В. Об использовании математических методов моделирования рубительных машин [Текст] / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: мат-лы 17-ой междунар. молодежной науч. – практ. конф. – 2018. – С. 158-159.

146. Фокин С. В. Об основных видах энергетической древесины [Текст] / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Forest Engineering: мат – лы науч. – практ. конф. с международным участием. – 2018. – С. 273-276.

147. Фокин С. В. Перспективы развития переработки низкокачественной древесины и отходов лесозаготовок на вырубках лесостепной зоны западной Сибири [Текст] / С. В. Фокин // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике: мат-лы XVII междунар. науч. практ. конференции. – 2018. – С. 282-286.

148. Фокин С. В. Современное состояние лесного и лесоперерабатывающего комплекса западной Сибири [Текст] / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Современные научно-практические решения в АПК: сб-к статей II всерос. (нац.) науч.-практ. конф. / Гос. аграрный ун-т северного зауралья. – 2018. – С. 149-152.

149. Фокин С. В. Способы транспортирования щепы из рубительных машин [Текст] / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Научная жизнь. – 2018. – № 2. – С. 10-15.

150. Фокин С. В. Математическая модель устройства для раскалывания древесины [Текст] / С. В. Фокин, А. О. Жукова, А. А. Назаров, А. В. Чугошкина, О. Н. Шпортько // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 1. – С. 61-64.

151. Фреинт С. А. Математическое моделирование гидросистемы станда с улучшенными характеристиками [Текст] / С. А. Фреинт, А. Т. Рыбак // Системный анализ, управление и обработка информации: труды VII междунар. семинара. – 2016. – С. 57-61.

152. Хасанов И.С. и др. Теоретические предпосылки определения некоторых параметров шнека, работающего совместно с ковшом планировщика. Аграрная наука, ж-л№6, Москва, 2015г.

153. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. – 638 с.

154. Хайбуллин Р.Р. Теоретические основы разрушения грунта при фрезеровании и бурении рабочими органами строительных машин: автореферат

диссертация доктора технических наук: 05.05.04. - М, 2008.  
[http://www.scholar.ru/speciality.php?spec\\_id=276](http://www.scholar.ru/speciality.php?spec_id=276). Наиболее важными при выполнении данной работы являются следующие три источника, описывающие использованные методы динамики частиц и SPH-метод.

155. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 638 с.

156. Чукичев А. Н. Технические средства для предупреждения и тушения лесных пожаров [Текст]: обзорн. информ. / А. Н. Чукичев. – М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1985. – 32 с.

157. Шаров А. В. Результаты экспериментальных исследований лесопожарной грунтометательной машины с энергосберегающим гидроприводом ротора [Текст] / А. В. Шаров // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 4, № 4 (30). – С. 107-112.

158. Шапиро В. Я. Математическое моделирование процесса разрушения массива почвогрунта плоскими ножами при использовании грунтометов для тушения лесных пожаров [Текст] / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – № 12. – С. 55-59.

159. Щербаков В. Ф. Рекуперативная система привода гидроподъёмных машин / В. Ф. Щербаков // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 9. – С. 49-51.

160. Шмойлова Р. А. Теория статистики / Р. А. Шмойлова. – 4 изд. – М.: Финансы и9. Bell B. The Tractor Ploughing Manual. Old Pond Publishing Ltd, 2004. 128 p.

161. Yue J. Risk management: A probe and study on forest fires (Article) [Текст] / J. Yue, Z. Feng, W. Jiang, X. Yang // College of Natural Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China – 2007. – Vol. 2. – P. 335-339.

Расчет технико-экономической эффективности

Технико-экономические расчеты выполнены по общепринятой методике [34]. Исходные данные для расчета экономической эффективности проектируемого агрегата представлены в таблице А1

Таблица А1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности экспериментального образца

Наименование показателя	Единицы измерения	Базовая модель	Проект. модель
Цена орудия (агрегата)	руб.	120000	160000
Часовая производительность орудия (агрегата)	пог.км/ч	2,63	3,81
Время смены	ч	8	8
Число смен		1	1
Годовая загруженность орудия	час	480	480
Цена трактора	руб.	1800000	1800000
Годовая занятость трактора на всех видах работ	час	600	600
Количество обслуживающего персонала / разряд	чел/разряд	1/v	1/v
Часовая тарифная ставка 1 разряда	руб.	25	25
Коэффициент, учитывающий надбавки и доплаты		2	2
Дополнительная зарплата	%	10	10
Страховые взносы	%	30	30
Отчисления по травматизму	%	0,5	0,5
Отчисления на амортизацию: - по орудию - по трактору	%	14,3	14,3
Отчисления на ТО и ремонт: - по орудию - по трактору	%	23	23
Цена нефтепродуктов	руб.	55	55
Часовой расход топлива	кг	26,0	26,0
Нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений		0,15	0,15

Таблица А2 – Показатели экономической эффективности внедрения  
проектируемого варианта

Показатели	Единицы измерения	Варианты	
		базовый	проектируемый
Производительность орудия:			
- часовая, $P_{ч}$	пог. км	2,63	3,81
- сменная, $P_{см}$		26,4	30,4
- годовая, $P_{год}$		1584,0	1824,0
Текущие затраты, приходящиеся на единицу выработки, $C$	руб./пог.км	1375,0	1226,2
Удельные капитальные вложения, $K_y$	руб./пог.км	1326,38	1175,98
Годовой экономический эффект, $\mathcal{E}_2$	руб.	—	312445,73
Срок окупаемости, год	год		0,53

РЕКОМЕДОВАНО:

Учебно-методической комиссией  
 Протокол № 1 от «10» 11 2022 г.  
 Председатель УМК по направлению  
 «Технологические машины и  
 оборудование»  
 к.т.н. доц. И.В. Четверикова Четверикова И.В.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе  
 ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова  
А.С. Черных Черных А.С.



АКТ

О внедрении в учебный процесс на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин разработок по разделу "Обоснование принципа компоновки и параметров грунтометательных машин для предупреждения и ликвидации лесных пожаров", предусмотренной госбюджетной тематикой кафедры «Разработка технологий и техники для лесовосстановления и защиты лесов от пожаров с обоснованием типа и параметров рабочих органов проектируемых машин на основе цифровых методов моделирования», и согласно развернутому плану кандидатской диссертации аспиранта Позднякова А.К. на тему «Обоснование параметров и режимов работы лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов»

1. Научный руководитель – д.т.н. проф. Попиков П.И.
2. Ответственный исполнитель – аспирант Поздняков А.К.
3. Наименование разделов темы, выполненной аспирантом:
  - а) теоретические исследования рабочего процесса и параметров лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов;
  - б) экспериментальные исследования.

4. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.

Разработана математическая модель и новая конструкция лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов, позволяющая повысить эффективность и качество проведения профилактических и лесопожарных работ.

5. Внедрение по дисциплинам: «Теория и конструкция технологических машин и оборудования лесного комплекса», «Процессы и машины в лесном комплексе».

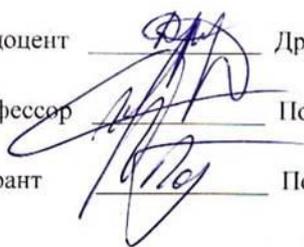
6. Влияние на качество подготовки бакалавров и магистров: результаты исследований повышают уровень учебного процесса и качество подготовки бакалавров и магистров.

7. Эффект от внедрения: использование указанных результатов позволяет повысить качество и эффективность проектирования лесопожарных и лесохозяйственных орудий.

Зав. кафедрой МЛХ и ПМ, к.т.н., доцент Д.Ю. Дручинин Дручинин Д.Ю.

Научный руководитель, д.т.н., профессор П.И. Попиков Попиков П.И.

Ответственный исполнитель, аспирант А.К. Поздняков Поздняков А.К.



Директор Новоусманского филиала  
СГБУ «Лесопожарный центр»

к.с/х.н. Малышев В.В.

18 июля 2022 г.

АКТ

**о внедрении законченной научно-исследовательской,  
опытно-конструкторской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова в лице руководителя научно-исследовательской (опытно-конструкторской работы, д.т.н. Пошиков П.И., ответственного исполнителя в лице аспиранта кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Позднякова А.К. и представитель Новоусманского филиала Специализированного государственного бюджетного учреждения «Воронежский лесопожарный центр», именуемое в дальнейшем «Предприятие», в лице директора Малышева Владимира Викторовича, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «Обоснование параметров и режимов работы лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов», выполненной на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, использованы при прокладке минерализованных полос путем использования опытной конструкции лесопожарного полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов.

Внедрение результатов исследований дало возможность Новоусманскому филиалу Специализированного государственного бюджетного учреждения «Воронежский лесопожарный центр» получить следующий технико-экономический эффект: повысилось качество профилактических и лесопожарных операций за счет повышения качества и эффективности технологического процесса в результате использования опытного образца лесопожарного полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов.

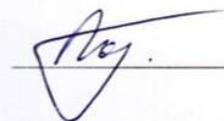
Замечания и предложения по дальнейшей работе по внедрению: продолжить исследования в области повышения качества проведения профилактических и лесопожарных операций и снижения энергетических затрат лесопожарных и лесохозяйственных орудий.

**Научный руководитель**



д.т.н. проф. Пошиков П.И..

**Исполнитель аспирант**



Поздняков А.К.

«Утверждаю»  
Директор ООО  
«СТАЛЬ-СИНТЕЗ», к.т.н.  
Лысыч М.Н.  
« 10 » июня 2022г.



**Акт  
о внедрении научно-исследовательской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова в лице руководителя научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы, доктора технических наук Попикова П.И., ответственного исполнителя в лице аспиранта кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Позднякова А.К. и представитель ООО «СТАЛЬ-СИНТЕЗ» в лице директора, кандидата технических наук Лысыча М.Н., составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «Обоснование параметров лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов», выполненной на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова в 2022г., использованы при проектировании и изготовлении экспериментального образца лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов.

Внедрение результатов исследования дало возможность предприятию получить следующий технико-экономический эффект: за счет использования математической модели рабочего процесса лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов удалось сократить сроки проектирования орудия.

Замечания и предложения по дальнейшей работе по -внедрению: продолжить работу по совершенствованию лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя с гидроприводом шнековых рабочих органов.

**Научный руководитель**



(подпись)

д.т.н., проф. Попиков П.И.

**Исполнитель аспирант**



(подпись)

Поздняков А.К.

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021617923

**«Программа для моделирования работы лесопожарной  
грунтометательной машины с гидроприводом активных  
рабочих органов»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова» (RU)*

Авторы: *Попиков Петр Иванович (RU), Поздняков Антон  
Константинович (RU), Шаров Андрей Викторович (RU),  
Посметьев Виктор Валерьевич (RU), Попиков Виктор Петрович  
(RU)*

Заявка № 2021616891

Дата поступления 04 мая 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 мая 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021663167

**«Программа для моделирования процесса взаимодействия  
шнекового рабочего органа лесопожарной  
грунтометательной машины с почвенно-растительной  
средой»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова» (RU)*

Авторы: *Попиков Петр Иванович (RU), Поздняков Антон  
Константинович (RU), Гнусов Максим Александрович (RU),  
Посметьев Виктор Валерьевич (RU), Попиков Виктор Петрович  
(RU)*

Заявка № 2021662214

Дата поступления **02 августа 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 августа 2021 г.**



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2762160

### Лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова" (RU)*

Авторы: *Попиков Петр Иванович (RU), Бартнев Иван Михайлович (RU), Поздняков Антон Константинович (RU), Лысыч Михаил Николаевич (RU), Попиков Виктор Петрович (RU), Петков Александр Федорович (RU)*

Заявка № 2021117044

Приоритет изобретения 10 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 декабря 2021 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 10 июня 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0x02A5CFB00B1ACF59A40A2F08092E9A118  
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**  
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

*Г.П. Ивлиев*



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2762965

### Лесопожарная грунтометательная машина

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова" (RU)*

Авторы: *Бартенев Иван Михайлович (RU), Попиков Петр Иванович (RU), Петков Александр Федорович (RU), Поздняков Антон Константинович (RU)*

Заявка № 2021121717

Приоритет изобретения 21 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 декабря 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 21 июля 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 0x02A5CF8C00B1ACF59A40A2F08092E9A118  
Владелец **Илиев Григорий Петрович**  
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

*Г.П. Илиев*

