

На правах рукописи



Петков Александр Федорович

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО РОТОРА-МЕТАТЕЛЯ
ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и
переработки древесины (технические науки).

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Воронеж – 2023

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, Драпалюк Михаил Валентинович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. Анализ способов и технических средств для предупреждения и тушения лесных пожаров.....	11
1.2. Анализ исследований рабочих процессов роторов-метателей технологических машин	18
1.3. Выводы.....	31
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РОТОРА-МЕТАТЕЛЯ.....	32
2.1. Обоснование конструктивно-технологической схемы лесопожарного грунтомета с трехступенчатым ротором-метателем...	32
2.2. Моделирование взаимодействия ротора-метателя с почвенной средой.....	34
2.2.1. Общая концепция построения формализованной модели.....	34
2.2.2. Обоснование общей концепции для формализованной модели ротора-метателя.....	36
2.2.3. Обоснование функциональных факторов модели, определяемых параметрами трёхступенчатого ротора-метателя.....	38
2.2.4. Математическое описание кинематики и динамики ротора-метателя при взаимодействии с почвогрунтом.....	42
2.2.5. Обоснование аксиом модели вращения трёхступенчатого ротора-метателя в рамках классической механики.....	43
2.3. Результаты вычислительного эксперимента по определению давления в исследуемой системе и скорости вращения ротора-метателя.....	45

2.4. Моделирование зависимости дальности полёта почвогрунта от конструктивных и технологических параметров ротора метателя...	48
2.5. Результаты вычислительного эксперимента по определению траектории движения в процессе метания почвогрунта с учетом конструктивных параметров ротора.....	51
2.6. Траектории движения в процессе метания с учётом физико-механических свойств почвогрунта.....	53
2.7. Моделирование распределения почвогрунта в слое выбрасывания....	57
2.8. Оптимизация формализованной модели.....	59
2.9. Сравнительные исследования параметров оптимизации процесса выброса грунта ротором-метателем по результатам вычислительного эксперимента.....	62
2.10. Выводы.....	73
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	75
3.1. Программа экспериментальных исследований.....	75
3.2. Методика и оборудование для экспериментальных исследований.....	75
3.3. Выводы.....	81
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОТОРА-МЕТАТЕЛЯ.....	83
4.1. Результаты лабораторных исследований ротора-метателя.....	83
4.2. Результаты полевых исследований рабочих процессов по обоснованию параметров ротора-метателя грунтомета.....	91
4.3. Выводы.....	103
5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ С ТРЕХСТУПЕНЧАТЫМ РОТОРОМ-МЕТАТЕЛЕМ.....	104
5.1. Результаты производственных испытаний опытного образца лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым	

ротором-метателем.....	104
5.2. Расчет экономической эффективности применения новой лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем.....	105
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	107
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Ежегодная статистика лесных пожаров, возникающих в разных странах, показывает нерешённые задачи и актуальность борьбы с неконтролируемыми лесными пожарами. Наиболее распространёнными противопожарными барьерами являются минерализованные полосы, Минерализованные полосы создаются почвообрабатывающими орудиями: плугами (ПКЛ-70, ПЛП-135), лесными фрезами, бульдозерами, полосопрокладывателями (ПЛ-3, ПФ-1), тракторными навесными и ручными грунтометами (ГТ-3). Основным рабочим органом грунтометательных машин, выполняющим фрезерование и метание потока почвогрунта в заданном направлении, является фрезерный рабочий орган. Но существующие фрезерные рабочие органы не позволяют создавать противопожарную полосу требуемой ширины с равномерным распределением грунта по толщине слоя и доставлять необходимое количество почвогрунта к кромке лесного низового пожара. Необходима разработка грунтометательной машины с комбинированным ротором-метателем, способным доставлять необходимый объем почвогрунта за счёт разделения уровней забора из разных пластов.

Для обоснования параметров ротора-метателя требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований с учётом физико-механических свойств почвогрунта, взаимодействующего с рабочими плоскостями ротора-метателя. Представленная диссертация является востребованной и актуальной.

Диссертационные исследования проводились согласно госбюджетной теме кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ: «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», сроки выполнения с 2021

по 2025 гг., а также гранта РФФИ «Аспиранты» «Развитие научных основ создания комбинированных роторов-метателей лесопожарных грунтометательных машин», сроки выполнения с 2020 по 2022 гг.

Степень разработанности проблемы

Рабочие процессы лесопожарных машин и орудий исследованы в работах И.М. Бартенева, И.В. Григорьева, М.В. Драпалюка, Д.В. Ескова, С.В. Фокина и др. Установлено, что существующие однорядные рабочие органы не способны обеспечить достаточным количеством почвогрунта потребность при ликвидации кромки открытого огня и предотвращения процессов горения. Комбинированный рабочий орган, состоящий из установки нескольких рядов лопаток на дисковых направляющих, позволит увеличить объем поднимаемого почвогрунта и разделить на несколько потоков для обеспечения необходимой ширины. Создание экспериментального образца возможно только после теоретического подтверждения работоспособности разрабатываемого агрегата с учётом физико-механических свойств почвы.

Целью работы является: обоснование параметров и режимов работы трехступенчатого ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины для повышения качества прокладки противопожарных полос.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1) разработать новую конструкцию лесопожарной машины с трехступенчатым ротором-метателем, обеспечивающим доставку необходимого объема почвогрунта по всей ширине полосы;

2) разработать имитационную модель рабочего процесса трехступенчатого ротора-метателя с учетом его новых конструктивных и технологических параметров;

3) обосновать конструктивные параметры трехступенчатого ротора-метателя и оптимизировать их с учетом параметров технологического процесса.

4) обосновать технологические режимы работы трехступенчатого ротора-

метателя и оптимизировать их по критериям качественных показателей прокладки противопожарных полос.

5) провести полевые испытания лабораторного образца лесопожарного грунтомета, и дать оценку технико-экономических показателей при его внедрении на предприятия лесного хозяйства.

Объектом исследования являются конструкция трехступенчатого ротора-метателя, параметры и технологический процесс его работы.

Предметом исследования является кинематика и динамика процесса взаимодействия трехступенчатого ротора-метателя с грунтом.

Научная новизна работы:

1) разработана новая конструкция лесопожарной машины с трехступенчатым ротором-метателем, отличающаяся способностью доставлять необходимый объем почвогрунта по всей ширине полосы за счёт разделения уровней забора из разных пластов подаваемого почвенного пласта;

2) разработана имитационная модель рабочего процесса трехступенчатого ротора-метателя, отличающаяся тем, что в ней учтены новые конструктивные и технологические параметры, а также физико-механические свойства грунта при метании на кромку огня.

3) обоснованы конструктивные параметры трехступенчатого ротора-метателя, отличающиеся рациональными значениями для повышения дальности выбрасывания грунта и общей толщины слоя высыпания.

4) обоснованы технологические режимы работы трехступенчатого ротора-метателя, отличающиеся повышенными значениями качественных показателей прокладки противопожарных полос.

5) результаты полевых испытаний лабораторного образца лесопожарного грунтомета, и оценка технико-экономических показателей при его внедрении на предприятия лесного хозяйства, отличающиеся повышением качества прокладки противопожарных полос.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении основных положений теории взаимодействия ротора-метателя с почвогрунтом.

Практическая значимость работы состоит в создании опытного образца лесопожарной грунтометательной машины; разработке рекомендаций по выбору режимов работы и основных конструктивных и технологических параметров трехступенчатого ротора-метателя для его внедрения в производство; разработке программного комплекса, осуществляющего вычислительный эксперимент; разработке математической модели рабочего процесса нового трехступенчатого ротора-метателя, позволяющей рассчитывать не только траектории движения грунта в зависимости от конструктивных и технологических параметров ротора-метателя, но и толщину слоя выбрасывания и распределение грунта в слое.

Полученные результаты работы внедрены в Воронежском лесопожарном центре, ООО «Сталь-Синтез» и в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» при подготовке бакалавров и магистров.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования.

Теоретические исследования проводились при помощи метода формализованного моделирования конструктивных и технологических параметров ротора-метателя в рамках комплексного подхода с обоснованием ограниченного числа параметров физико-механических свойств почвогрунта. При проведении экспериментальных исследований применялась теория планирования эксперимента, теория вероятности и математической статистики.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) разработанная новая конструкция лесопожарной машины с трехступенчатым ротором-метателем, позволяющая доставлять необходимый

объем почвогрунта по всей ширине полосы за счёт разделения уровней забора из разных пластов подаваемого почвенного пласта;

2) разработанная имитационная модель рабочего процесса трехступенчатого ротора-метателя, позволяющая учитывать и оптимизировать новые конструктивные и технологические параметры с учетом физико-механических свойств грунта.

3) обоснованные конструктивные параметры трехступенчатого ротора-метателя, позволяющие получить его рациональные конструктивные значения с учетом толщины слоёв высыпания от каждой ступени, дальности выбрасывания грунта и общей толщины слоя высыпания;

4) обоснованные технологические режимы работы трехступенчатого ротора-метателя, позволяющие повысить качественные показатели прокладки противопожарных полос.

5) результаты полевых испытаний лабораторного образца лесопожарного грунтомета, и оценка технико-экономических показателей при его внедрении на предприятия лесного хозяйства, позволяющие повысить качество профилактики и тушения лесных низовых пожаров.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обосновывается проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями, высокой степенью сходимости результатов изучения рабочих процессов ротора-метателя, применением современных методов статистической обработки данных.

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: международной научно-практической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе» (г. Воронеж, 2020 г.), международной научно-технической конференции «Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества - взгляд в будущее.» (г. Воронеж, 2020 г.), всероссийской националь-

ной научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности лесного комплекса» (г. Петрозаводск, 2021), Всероссийской научно-практической конференции «Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса.» (г. Воронеж, 2021г.), а также научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (2020–2022 гг.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты, полученные при проведении научных исследований, соответствуют п. 5 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы лесозаготовительных и лесохозяйственных машин» паспорта научной специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (технические науки).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований, разработке конструкции и изготовлении экспериментального образца, планировании и проведении экспериментов, анализе результатов исследований, а также подготовке основных публикаций по теме исследования.

Публикации. Материалы в рамках диссертационной работы были опубликованы в 23 работах, 5 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК, 11 публикациях по материалам международных и всероссийских конференций, 3 патентах на изобретение, 3 программах для ЭВМ, 1 статье в издании в международной базе цитирования Scopus.

Структура и объем работы. В структуру диссертации входит введение, пять глав основного текста, основные выводы и рекомендации, а также библиографический список и приложения. Общий объем работы составил 133 страницы печатного текста, из них основного текста – 109 страниц, библиографический список и приложения – 24 страницы. Работа включает 78 рисунков, 17 таблиц и 128 использованных источников, 7 из которых – зарубежные.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ способов и технических средств для предупреждения и тушения лесных пожаров

Противопожарная профилактика в лесах предполагает реализацию ряда рекомендованных мер, нацеленных на предупреждение появления источников возгораний лесных массивов. В первую очередь эти мероприятия должны быть направлены на максимально возможное устранение причин возгорания леса.

К специально создаваемым противопожарным препятствиям относятся: минерализованные полосы, противопожарные заслоны, противопожарные разрывы, пожароустойчивые опушки, противопожарные канавы.

Наиболее распространёнными противопожарными барьерами, созданными человеком, являются минерализованные полосы. Это искусственно созданные полосы расчищенной почвы, с которой удаляются: травяной покров, лесная подстилка до минерального слоя. Основное их назначение – останавливать неконтролируемое продвижение огня по лесу, быть опорной линией при методе борьбы в виде отжига.

Минерализованной полосой считается участок, очищенный от горючих материалов. Таким образом, при формировании минерализованной полосы весной уход за ней проводится в осенний период, а на следующий год в весенний и осенний периоды. Количество уходов зависит от лесорастительных и погодных условий, а также способа создания полос. Минерализованные полосы как самостоятельные барьеры создаются вдоль дорог, по квартальным просекам, в сочетании с дорогами по противопожарным разрывам, вокруг пожароопасных объектов.

Минерализованные полосы создаются почвообрабатывающими орудиями: плугами (ПКЛ-70, ПЛП-135), лесными фрезами, бульдозерами, поло-

прокладывателями (ПЛ-3, ПФ-1), тракторными навесными и ручными грунто-метами (ГТ-3) [11, 12, 13]. Основным рабочим органом, выполняющим метание потока почвогрунта в заданном направлении и необходимом объёме для ликвидации и проведения профилактических работ, является фрезерный рабочий орган.

Противопожарные минерализованные полосы создаются шириной от 0,4 до 1,4м, на расстоянии от 10 до 15 метров между полосами.

Для ликвидации лесного пожара и качественного создания, и обновления минерализованных полос целесообразно использовать грунтометательную технику, фреза-метатель, которой обеспечивает достаточную ширину и глубину создаваемой минерализованной полосы.

Исследованиям роторов-метателей шнеко-роторной машины посвящена работа Яконовского П.А. [1] (рисунок 1.1).

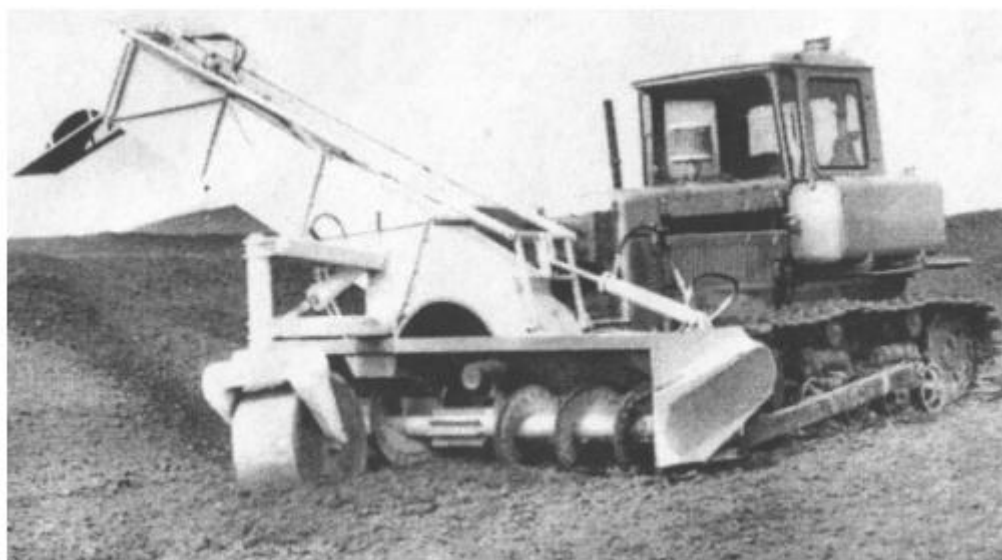


Рисунок. 1.1 - Уборочная шнеко-роторная машина для торфа

Машина со шнеко-роторным рабочим органом посредством ротора-метателя выполняет сбор и транспортировку фрезерного торфа в кузов или штабель транспортного средства. Ширина полосы разбрасывания достигает 8 метров. Основными геометрическими параметрами ротора-метателя являются

угол разгрузки ротора, равный углу поворота лопасти до полного схода торфа с лопасти.

Создание фронтального лесопожарного грунтомета (рисунок 1.2) на базе Сибирского государственного университета науки и технологий занимались Максимов Е.И. и Федорченко И. С.

Созданная машина навешивается впереди трактора 1, фрезерный рабочий орган установлен на оси качания 4, направляющий кожух 5 установлен шарнирно на несущей раме 2, которая поднимается и опускается с помощью гидроцилиндров 6 и 7. Фрезерный рабочий орган приводится во вращение от гидромотора 8.

В существующем фронтальном лесопожарном грунтомете (патент РФ №2400274 опубликован: 27.09.2010) (рисунок 1.2) рабочий орган (рисунок 1.3) выполнен в виде лопаток 11, которые закреплены на фрезерном диске 12, который фиксируется на валу 13 [2].

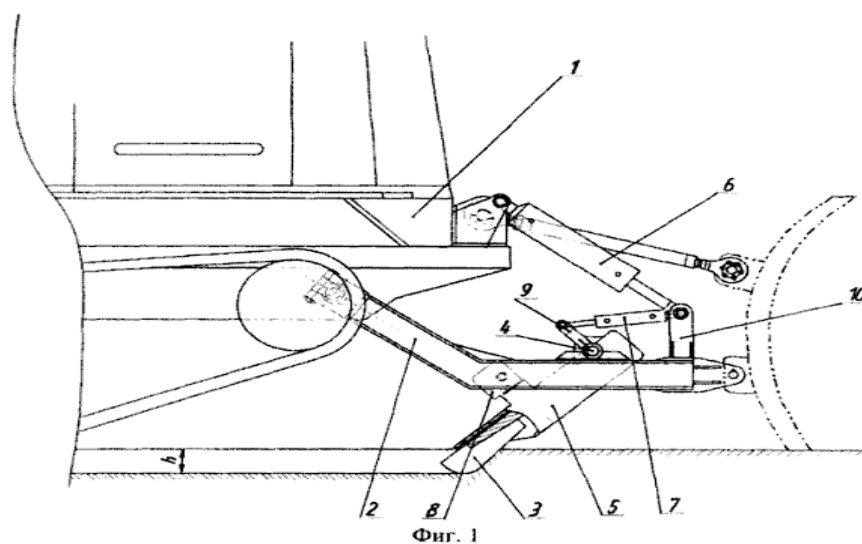


Рисунок 1.2 – Общий вид фронтального лесопожарного грунтомета

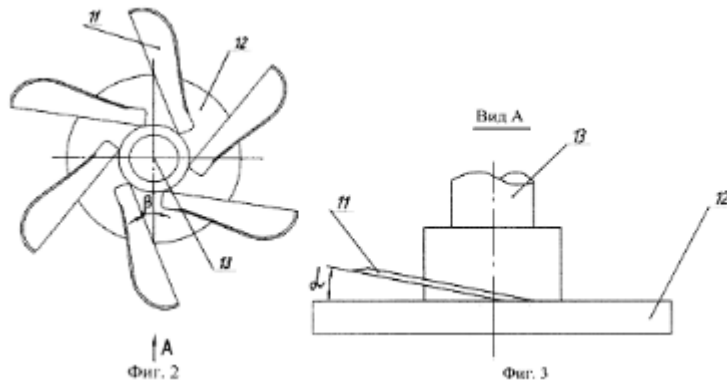


Рисунок 1.3 – Рабочий орган фронтального лесопожарного грунтомета

Лопатки 11 представляют собой фигуру спирали «жезл» и установлены на фрезерном диске 12 под углом α между задней кромкой лопатки и плоскостью вращения фрезерного диска 12 с уклоном по ходу движения на угол β .

Все же, из-за малой глубины фрезерования грунт выбрасывается в недостаточном количестве, следствием чего является низкая эффективность тушения лесных низовых пожаров грунтом.

Известен рабочий орган центробежного разбрасывателя удобрений (патент РФ №2172578 опубликован: 27.08.2001) [3] (рисунок 1.4)).

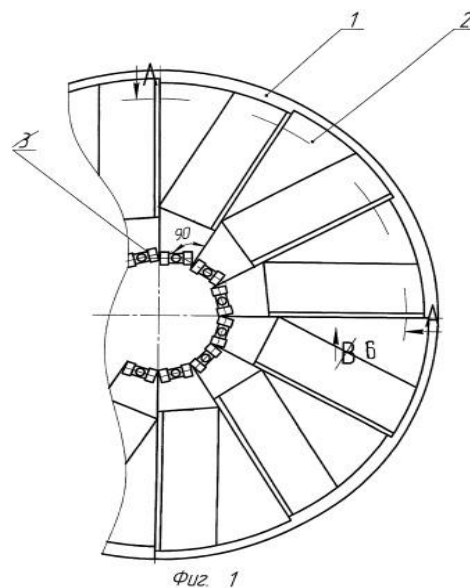


Рисунок 1.4 - Рабочий орган центробежного разбрасывателя удобрений

Рабочий орган представляет собой плоский центробежный диск с закрепленными основными лопатками, между которыми установлены сегменты с лопатками, с возможностью изменять угол их наклона относительно диска. При использовании такой конструкции повышается ширина захвата и производительность.

Известен фрезерный полосопрокладыватель ПФ-1 (рисунок 1.5). На ступице 1, закрепленной на приводном валу 3 с помощью шлицевого соединения шарнирно установлены фрезерные лопатки 2, которые с помощью тяг 5, подвижной ступицы 4 и пружин 6 могут изменять угол наклона в вертикальной плоскости при встрече лопаток с препятствием. За счет синхронного отклонения на заданный угол с помощью гайки 7 можно регулировать глубину хода рабочих органов и количество метаемого грунта.

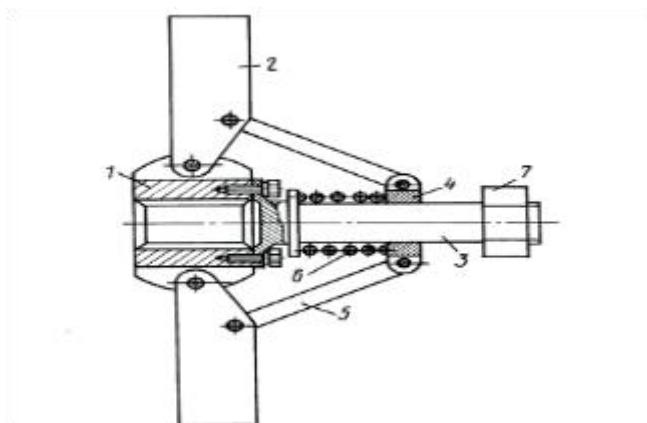


Рисунок 1.5 - Общий вид фрезерного рабочего органа

Известна лесопожарная грунтометательная машина (Патент РФ № 2616021; МПК E02F 3/18; опубл. 12.04.2017) [5] (рисунок 1.6)), включающая раму 1 с навесным механизмом, фрезу-метатель 2 с приводом от аксиально-поршневого гидромотора 3, кожух-рыхлитель 4, ножи 5, установленные под тупым углом к направлению движения. При движении с помощью трактора кожух-рыхлитель 4 заглубляется в почву на установленную глубину, и поток почвы подается к фрезу-метателю с тремя радиальными лопатками с режущими

кромками, которые измельчают пласт с порубочными остатками и поток грунта за счет центробежной силы выбрасывается в сторону кромки лесного пожара. Наклонные ножи 5 под тупым углом предохраняют рабочий орган при наезде на пни.

Недостатком данной машины является то обстоятельство, что к ротору-метателю подаётся заранее не обработанные пласты почвы в связи с чем ротор-метатель забивается почвой.

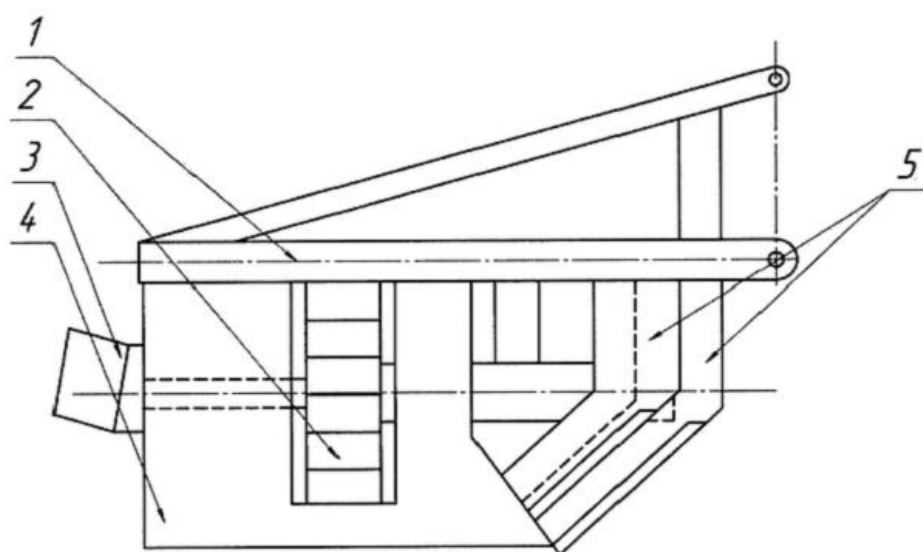
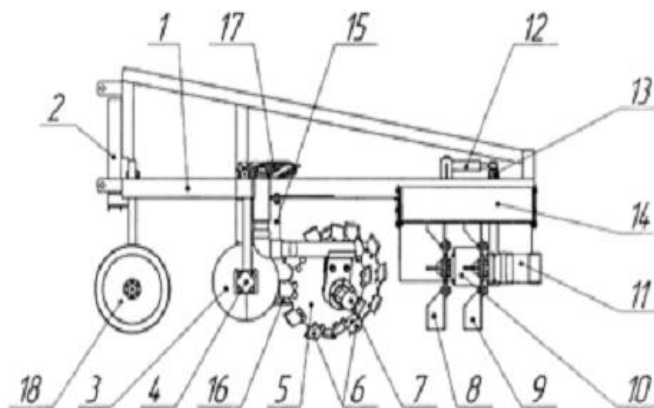


Рисунок 1.6 - Лесопожарная грунтометательная машина

Известен пожарный грунтомет-полосопрокладыватель (Патент РФ № 2684940; МПК E02F 3/18; E02F 5/00; A62C 3/02; опубл. 16.04.2019) (рисунок 1.7), в котором установлены дополнительные дисковые рабочие органы 6 с вырезными дисками с приводом от отдельных гидромоторов 7, которые производят предварительную подготовку почвы перед роторами-метателями. Кроме того, перед дисковыми корпусами установлены шнековые рабочие органы 3 для удаления лесной подстилки из потока грунта.

Недостатком является отсутствие предохранительных устройств для шнековых рабочих органов и фрез-метателей при наезде на препятствие.

Машина для тушения лесного наземного пожара разработанная с целью тушения наземного лесного пожара (Пат. РФ № 2706040; МПК А62С 27/00; опубл. 13.11.2019) (рисунок 1.8), имеет конический рабочий орган 6 с лопатками 7 с возможностью изменения угла наклона, с приводом от гидромотора 11. Скоба прямоугольной формы 4 заглубляется в грунт на заданную опорным колесом 3 глубину, вырезая пласт почвы, и направляет его по наклонному лотку 5 к лопаткам 7 метателя. С помощью гидроцилиндра 10 и шарнира 9 рама 8 может отклоняться от основной рамы 1 на некоторый угол. Присоединение к трактору производится с помощью навесного устройства 2.



- 1 - рама; 2 - навесное устройство; 3 - шнек; 4 - гидромотор; 5 - вырезной диск; 6 - дисковый корпус; 7 - гидромотор; 8,9 - роторометатели; 10,11 - гидромоторы; 12 - гидроцилиндр; 13 - стойка; 14 - козырёк-направитель; 15 - ось; 16 - рыхлитель; 17 - пружина; 18 - опорное колесо

Рисунок 1.7 - Пожарный грунтомет-полосопрокладыватель

Недостатком является то, что подача грунта к ротору-метателю не равномерна.

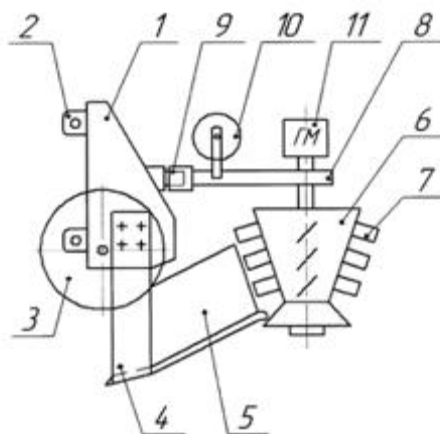
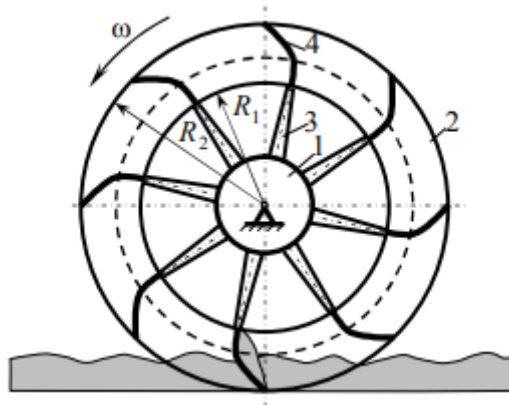


Рисунок 1.8 - Машина для тушения лесного наземного пожара

Для ликвидации лесного пожара и качественного создания, и обновления минерализованных полос целесообразно использовать грунтометательную технику, фреза-метатель, которой обеспечивает достаточную ширину и глубину создаваемой минерализованной полосы.

1.2. Анализ исследований рабочих процессов роторов-метателей технологических машин

В работе Шатохина В.М. [6] рассмотрена проблема выбора оптимальной формы лопатки роторного грунтометателя. Предлагается использовать в роторах-метателях криволинейные лопатки. Ставится задача определения формы кривой, которая обеспечивает минимальное время движения. Проведены расчёты траекторий лопаток грунтометателя с оптимальной формой лопаток (рисунок 1.9).



1 - ступица; 2 - кольцо; 3 - спица; 4 - криволинейная лопатка

Рисунок. 1.9 - Расчётная схема грунтометательных механизмов

Получено математическое выражение для определения оптимальной траектории движения материальной точки А под действием центробежной силы F в точку В за минимальное время (рис. 1.10) [6].

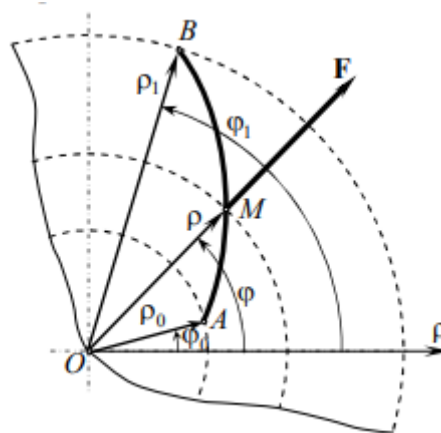
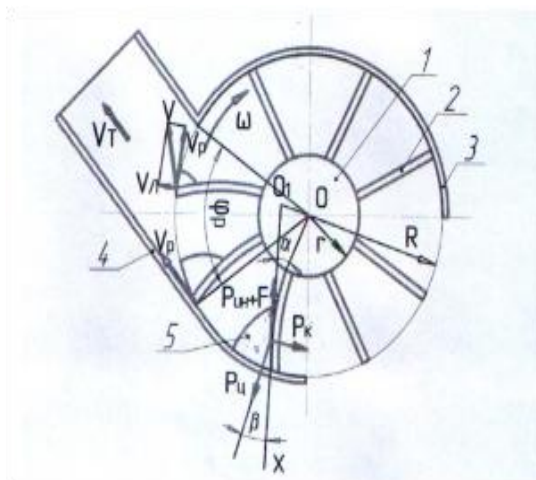


Рисунок. 1.10 - Рисунок для построения брахистохроны
в поле центробежных сил

В работе Яконовского [1] проведены экспериментальные исследования рабочего процесса ротора-метателя уборочной шнеко-роторной машины УШР-1 для перемещения торфа (рисунок 1.11).



1 - ступица; 2 - лопасть; 3 - неподвижный кожух; 4 - выпускной патрубок;
5 - призма волочения торфа перед лопастью

Рисунок 1.11 - Схема взаимодействия ротора с торфом

Когда щёточный ротор соприкасается с торфом, тогда происходит образование следующих сил: сила инерции $P_{ин}$ обратного направления движения, силы скольжения торфа о лопасти, $P_{ц}$ — радиально устремлённая центробежная сила, а также перпендикулярно направлению движения кориолисова сила $P_{к}$.

Определены геометрические параметры ротора, угол разгрузки ротора, дальность отбрасывания торфа, производительность [1]

Проведены теоретические исследования рабочего процесса роторного зернометателя. Определены условия влияющие на уровень напряжения при столкновении с лопаткой при метании зерна. Получены графические зависимости коэффициента поперечной деформации (Пуассона) зернового ядра и вещество лопатки.

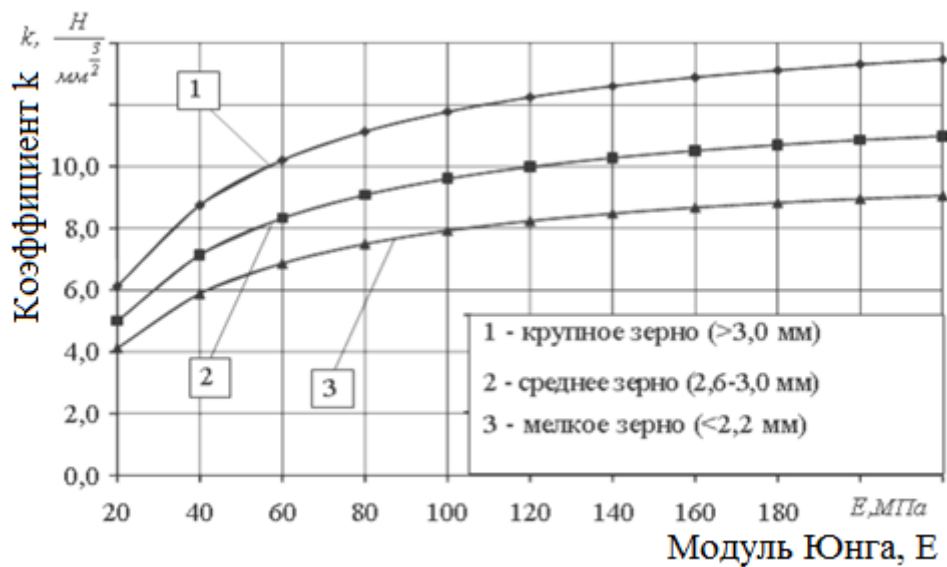


Рисунок 1.12 - Зависимости коэффициента k от модуля Юнга E для крупной, средней и мелкой фракций единичных зёрен

По формуле определяется упругая деформация частицы:

$$\alpha = \left[\frac{5}{4} \cdot \frac{m V_n^2}{k} \right]^{\frac{2}{5}}, \quad (1.1)$$

где V_n – относительная скорость контактирующих тел (далее $V_n = V^{n1}$),
 m – масса контактирующих тел, кг.

Для определения мгновенной силы удара получена зависимость:

$$P = k \cdot \left[\frac{5}{4} \cdot \frac{m_1 V_n^2}{k} \right]^{\frac{3}{5}}. \quad (1.2)$$

Получены зависимости напряжения в зерновке от коэффициента k.

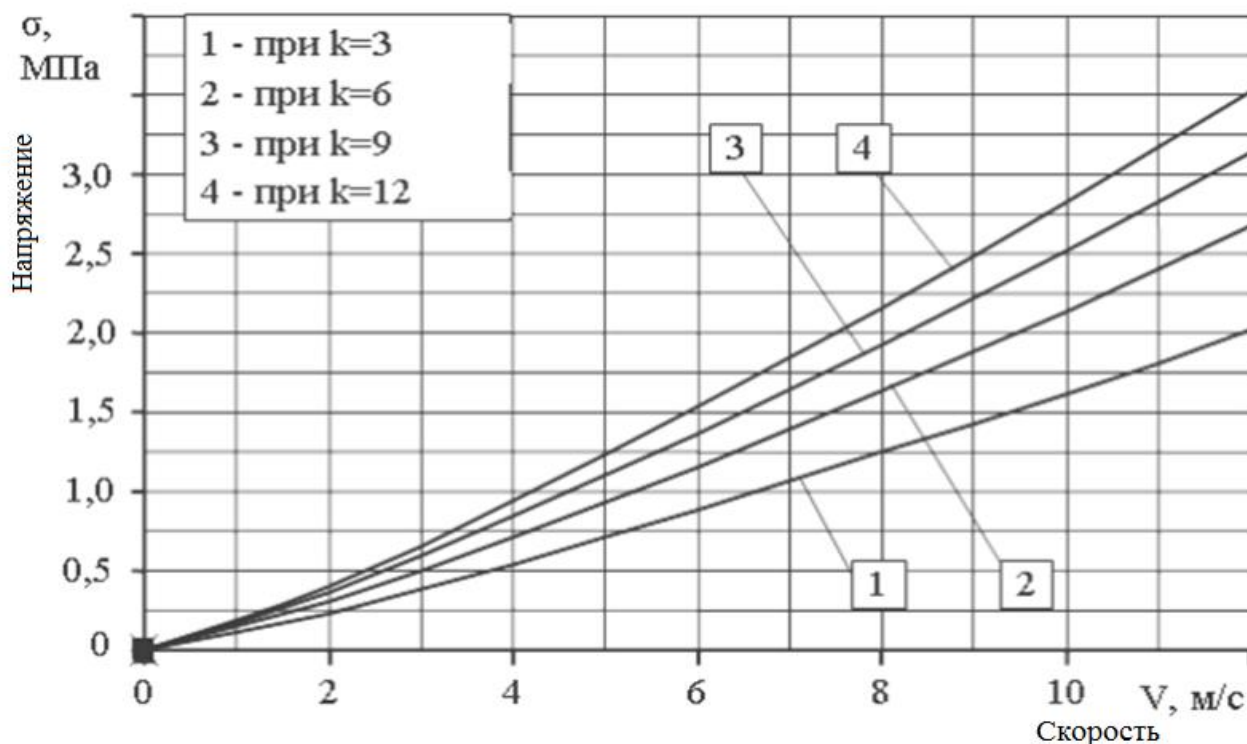


Рисунок 1.13 - Зависимости напряжения от скорости V_H^2

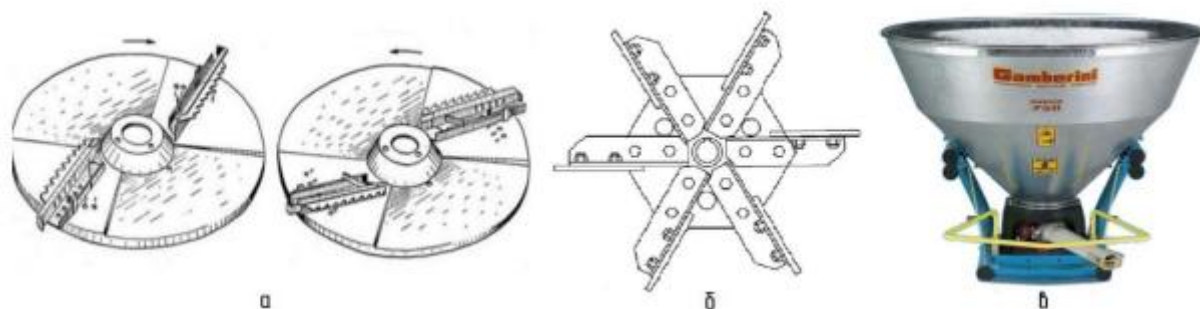
При увеличении скорости от 2 до 10 м/с происходит скачок напряжения в 10 раз, который существенно влияет на качество зерна (рисунок 1.13) [7].

Мащенко А.А. [8] в своём аналитическом обзоре, основываясь на изучении и анализе технической литературы, а также различных исследований попытался обосновать необходимость кинетических параметров почвообрабатывающих фрез, получивших мировое распространение в последние годы. Оптимальные условия фрезерования получаются при заглублении фрезерного барабана 0,71...0,83 D_ϕ (диаметр барабана) при вращении фрезы по ходу движения сверху вниз и 0,8...0,91 D_ϕ при встречном снизу вверх.

Диаметр фрезы не влияет на степень крошения, но уничтожение сорняков находится в пределах 94...96% что превышает степень крошения других способов обработки почвы. Рекомендуемая подача на нож 0,048...0,07 м, скорость резания 10-12 м/с при обработке задернелых лесных и луговых почв и 4-6 м/с при работе на старопахотных почвах.

В работе Короткова И. В. [10] дан анализ конструкций рабочих органов гранулированных удобрений и определены направления научных исследований.

На рисунке 1.14 представлены конструкции рабочих органов разбрасывателей удобрений с вертикальной и горизонтальной осью вращения.



а - с вертикальной осью вращения; б - с горизонтальной осью вращения;
в - общий вид разбрасывателя с рабочим органом в виде маятниковой трубы
с вертикальной осью вращения

Рисунок 1.14 - Конструкции рабочих органов разбрасывателей удобрений

Основным недостатком является то, что часть материала не успевает сходиться с поверхности лопаток и происходит осыпание в непосредственной близости от диска, при этом нарушается равномерность рассева удобрений и снижения урожайности сельскохозяйственных культур. Предлагается для точного направления потока удобрений и равномерного разбрасывания использовать роторные рабочие органы с применением дефлекторов (рисунок 1.15).

Предлагается в кузовном разбрасывании применять комбинированный рабочий орган с горизонтальной осью вращения двух роторов и разбрасывающего диска с вертикальной осью вращения.

В работе Шарова [5] проведены экспериментальные исследования влияния частоты вращения ротора лесопожарной грунтометательной машины на производительность, дальность полёта и потребляемую мощность. Установле-

но, что при показателе угловой скорости вращения в диапазоне от 8 до 9 с⁻¹ при оптимальной частоте вращения средняя дальность выброса грунта составила около 20 м. а производительность 0,21 м³/сек. Потребляемая мощность ротором лесопожарной машины находилась в пределах 36...36,3 кВт.

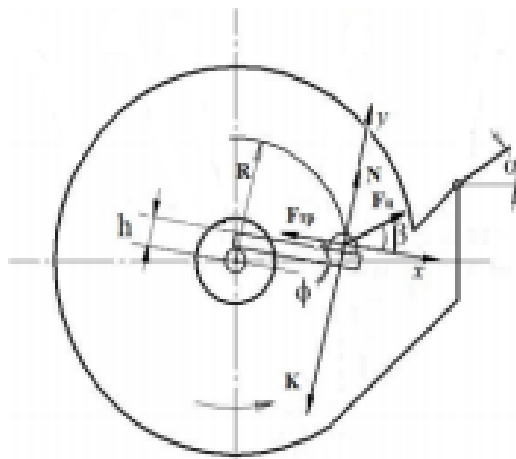


Рисунок 1.15 - Роторный разбрасыватель с дефлектором

В работе Гнусова М.А. [25] был составлен, смоделирован и описан математический процесс разброса грунта ротором-метателем с предварительной подготовкой почвенного грунта дисковыми рабочими органами.

В математической модели использован метод динамики частиц, при котором грунт представляется в виде большого количества элементов малого размера шарообразной формы, которые контактируют между собой и с поверхностью рабочих органов (рисунок 1.16)

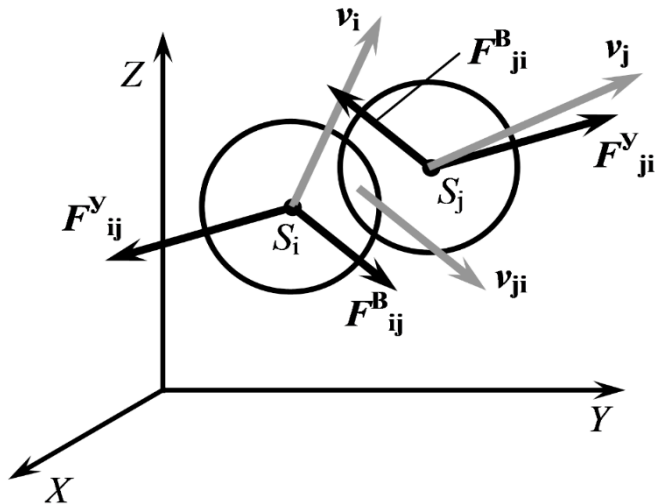


Рисунок 1.16 – Вязкоупругое взаимодействие двух элементов грунта

Согласно второму закону Ньютона составлена математическая модель движения частиц грунта в виде уравнений:

$$\begin{aligned}
 m_{\ominus} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\ominus}} (F_{xij}^y + F_{xij}^B) ; \\
 m_{\ominus} \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\ominus}} (F_{yij}^y + F_{yij}^B) ; \\
 m_{\ominus} \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\ominus}} (F_{zij}^y + F_{zij}^B) - m_{\text{ш}} g
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

где m_{\ominus} – масса элемента, кг;

t - текущее время, с;

N_{\ominus} – количество шарообразных элементов, шт;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Согласно III закону Ньютона при взаимодействии двух элементов силы равны по модулю и противоположно направлены:

$$F_{ji} = -F_{ij}.$$

Рабочие поверхности ротора-метателя и сферических дисков представлены в виде элементарных треугольников (рисунок 1.17)

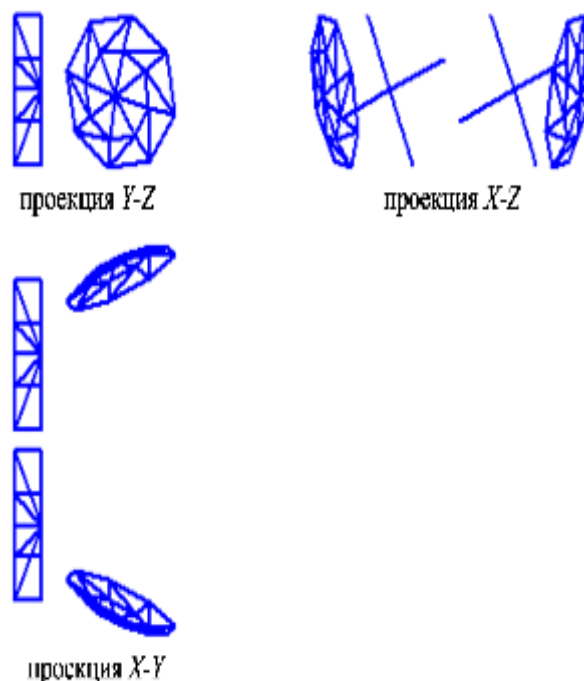


Рисунок 1.17 – Расчётные схемы рабочих поверхностей ротора-метателя и сферических дисков

Программа ЭВМ выводит гистограммы и результаты моделирования в виде взаимодействия рабочих органов с почвой (рисунок 1.18).

Проведены исследования и выявлены зависимости эффективности грунтомета от частоты вращения ротора (рисунок 1.19). Как следует из графиков расчётная частота вращения ротора должна находиться в пределах 8-10 об/сек, при этом дальность выброса отдельных частиц грунта составляет около 12 метров, а производительность достигает величины 40-50 кг/сек. Мощность не превышает 9 кВт.

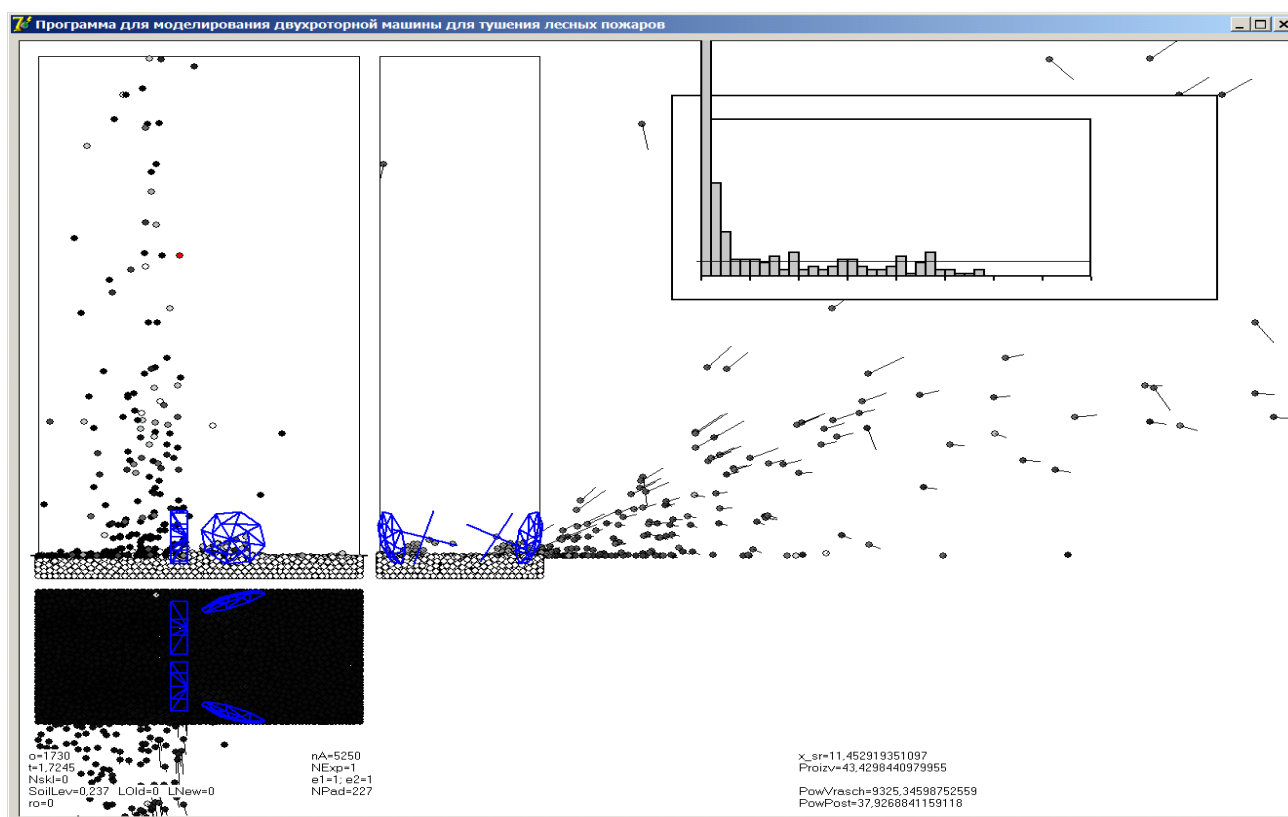
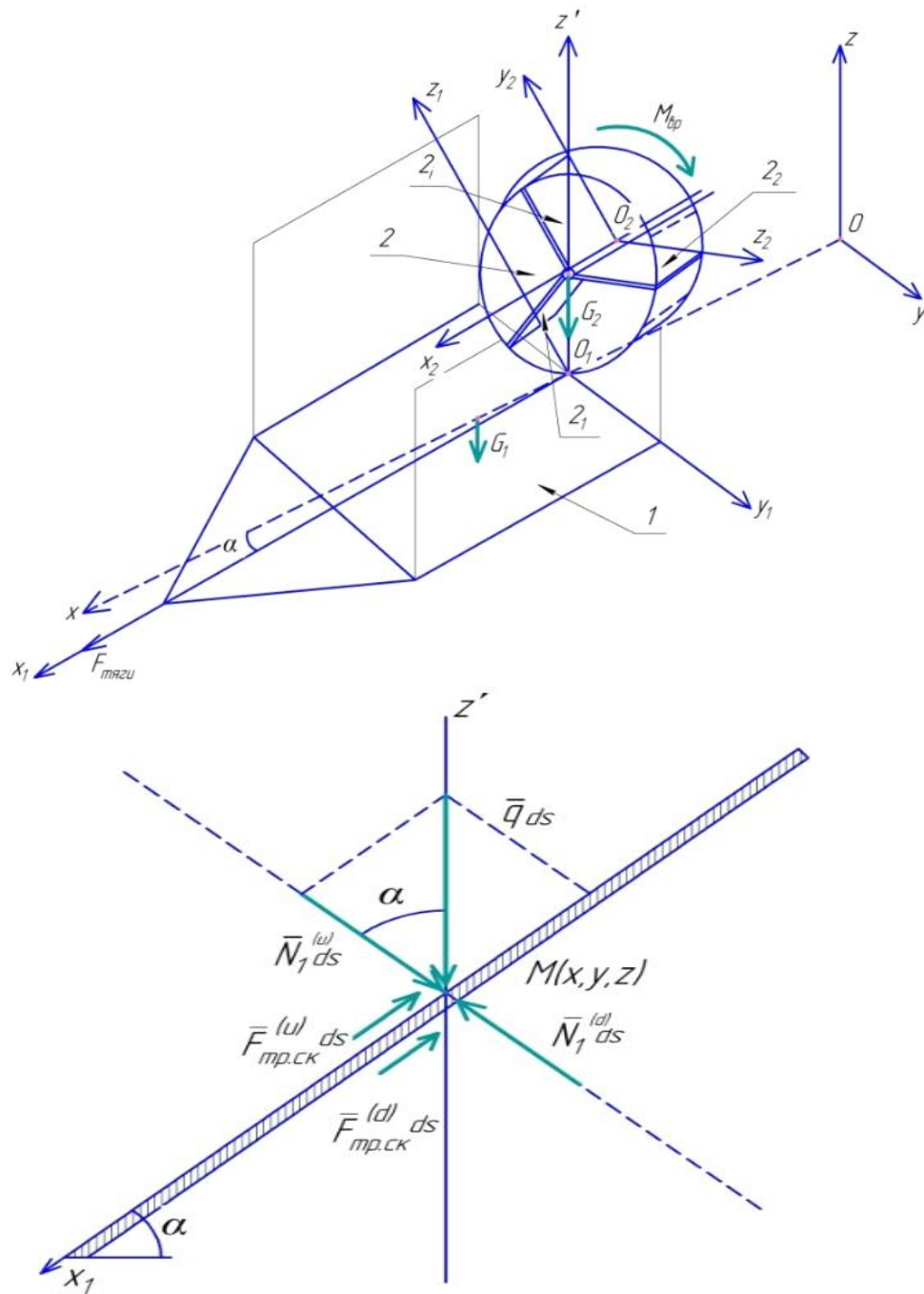


Рисунок 1.18 – Вывод результатов моделирования в разработанной программе для моделирования двухроторной машины

В работе Ступникова Д.С. [8] проведено теоретическое исследование рабочего процесса ротора-метателя с тремя радиальными лопатками. Принято, что неподвижная система координат $OXYZ$ связана с почвой (рисунок 1.19). Составлена математическая модель, в которую входят уравнения поступательного движения кожуха-рыхлителя и уравнение вращательного движения.



1 – кожух-рыхлитель, 2 – ротор-метатель

Рисунок 1.19 – Расчетная схема грунтомета

С целью изучения перемещение компонентов грунтометательной машины сформируем систему уравнений их перемещения и оформим их в виде уравнений Лагранжа II рода. По окончании подсчёта обобщённых сил уравнения, система принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_1 + m_2) \ddot{x} = F_{\text{тяги}} - (f^d + f^u) \cos^2 \alpha \int_{(S_1)} q(x_1, y_1) ds - bh\sigma_p; \\ J_{x_2} \ddot{\varphi} = M_{\text{вр}} - \sum_{i=1}^N \int_{S_{2i}} N_2(y_2, \varphi_i) \cdot y_2 ds. \end{array} \right. \quad (1.4)$$

где m_1 - масса ротора, кг;

m_2 - масса грунта, кг;

b - ширина режущего элемента, м;

h - толщина срезаемой стружки, м;

σ_p - удельное сопротивление грунта резанию, Н/мм²;

f^d, f^u - коэффициенты трения-скольжения стали о плотный (d) и взрыхленный (u) грунт;

q - вес столбика разрыхлённого грунта с основанием ds , кг;

N_2 - сила нормального давления, Н;

F_m - сила тяги трактора, Н.

Допустив установление перемещения системы, то есть, в случае если \ddot{x} и $\ddot{\varphi}$ будут равны нулю, то из системы уравнений (1.4) получаем возможность вычислить нужную силу тяги и значение вращающего момента:

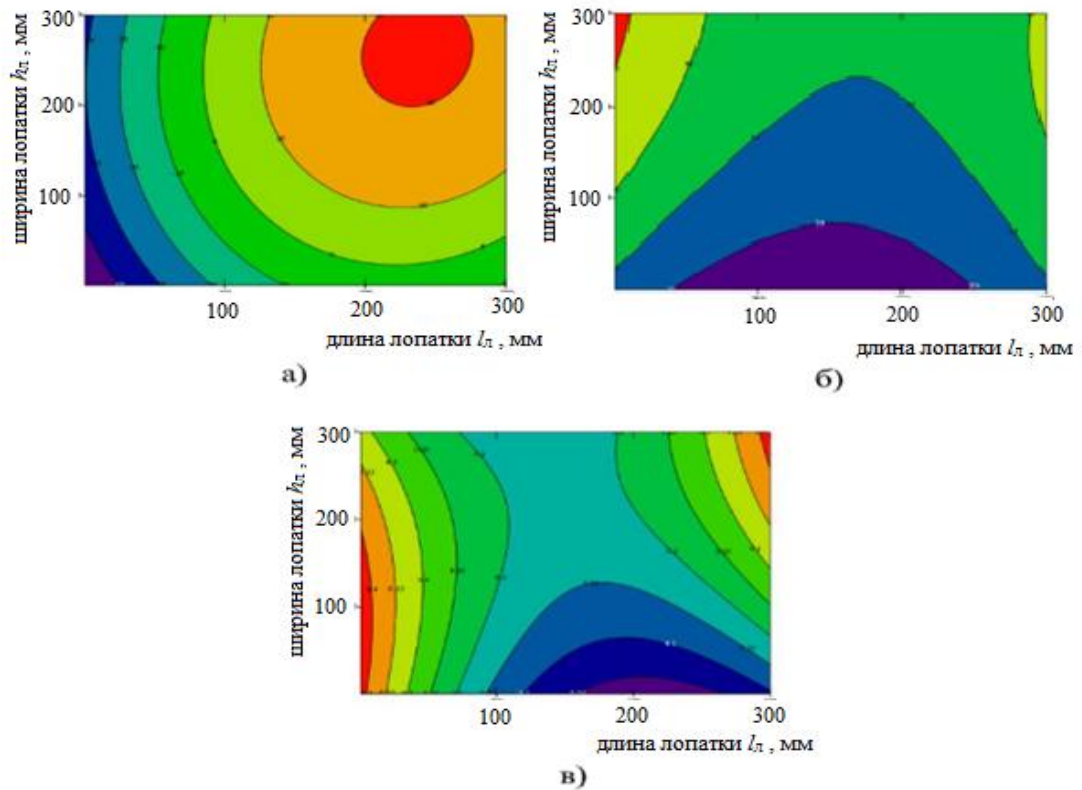
$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\text{тяги}} = (f^d + f^u) \cos^2 \alpha \int_{(S_1)} q(x_1, y_1) ds + F_p; \\ M_{\text{вр}} = \sum_{i=1}^N \int_{S_{2i}} N_2(y_2, \varphi_i) \cdot y_2 ds. \end{array} \right. \quad (1.5)$$

В результате имитационного моделирования получены зависимости ширины лопатки ротора от показателей эффективности. Так же проведена оптимизация параметров ротора, при которых дальность полёта и производительность имеют максимальное значение, а потребляемая мощность минимальное. Целевая функция оптимизации имеет вид:

$$\begin{cases} L_{\text{ср}}(l_{\text{л}}, h_{\text{л}}) \rightarrow \max; \\ P(l_{\text{л}}, h_{\text{л}}) \rightarrow \max; \\ N(l_{\text{л}}, h_{\text{л}}) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (1.6)$$

Проведена оптимизация параметров ротора, при которых дальность выброса грунта и производительность имеют максимальное значение, а потребляемая мощность – минимальное.

По результатам оптимизации получены поверхности отклика при оптимизации конструктивных параметров ротора (рисунок 1.20):



а – для дальности выброса грунта $L_{\text{ср}}$, м; б – для мощности N , кВт;
 в – для производительности P , км/ч; где ось OX – длина лопатки $l_{\text{л}}$, мм,
 OY – ширина лопатки $h_{\text{л}}$, мм.

Рисунок 1.20 - Поверхности отклика при оптимизации конструктивных параметров ротора

Анализ полученных данных показал оптимальное значение длины и ширины лопатки, которые равны соответственно 200...230 мм ($l_{л}$), а ширина $h_{л} = 150...220$ мм. При этом мощность на привод ротора составила 35...38 кВт.

1.3 Выводы.

1. В ходе исследования рассмотрены причины возникновения и меры, применяемые для борьбы и предотвращения лесного пожара. Рассмотрены конструкции существующих агрегатов и фрез-метателей, в частности, а также проведён анализ научных трудов в области исследования. Для защиты от лесных пожаров высокоэффективными являются агрегаты с активными рабочими органами, но существующие фрезерные рабочие органы не позволяют доставлять необходимое количество почвогрунта к кромке лесного низового пожара.

2. Необходима разработка грунтометательной машины с комбинированным фрезерным рабочим органом, способным доставлять необходимый объем почвогрунта за счёт разделения уровней забора из разных пластов.

3. Для снижения энерго- и трудозатрат требуется проведение теоретических исследований, в частности, разработка имитационной модели с учётом физико-механических свойств почвогрунта, взаимодействующего с рабочими плоскостями агрегата.

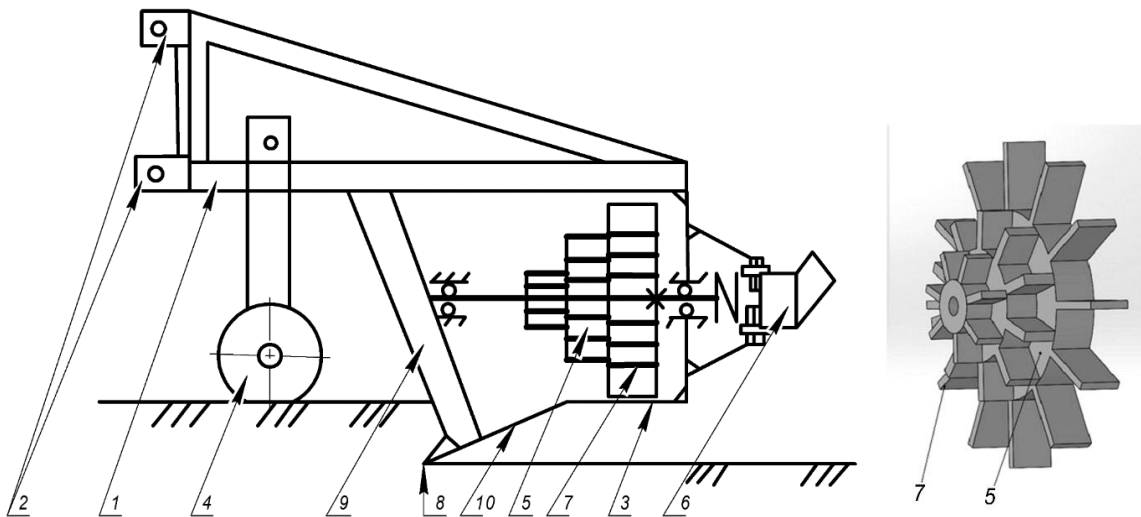
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РОТОРА-МЕТАТЕЛЯ

2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы лесопожарного грунтомета с трехступенчатым ротором-метателем

При решении проблемы повышения качества работы роторов-метателей как рабочих органов лесопожарных грунтометов в условиях низового лесного пожара предлагается конструкция (рисунок 2.1), в которой реализуется подача грунта ко всем лопаткам ротора-метателя одновременно. Предложенное нами изобретение повышает качество прокладки противопожарных полос и тушения лесного низового пожара.

Согласно изобретению, ротор-метатель имеет три ступени, так называемые диски разного диаметра, на которых установлены радиальные лопатки прямоугольной формы. Лопатки размещены со смещением по винтовой линии и регулируются по углу наклона от радиального положения. Ротор смонтирован на горизонтальной оси вращения над уровнем почвы. Рабочим органом для подготовки грунта служит U-образная скоба с лемехом и лотком-подъемником. По краям и в центре скобы установлены предохранительные наклонные черенковые ножи с тупым углом вхождения в почву. Лоток-подъемник наклонён к горизонту на угол менее угла трения почвы о сталь.

При таком исполнении лесопожарной грунтометательной машины повысится качество прокладки противопожарных полос и тушения лесного низового пожара за счёт подачи грунта ко всем радиальным лопаткам трёхступенчатого ротора-метателя одновременно.



1 – рама; 2 - механизм навески; 3 - кожух-рыхлитель; 4 - опорные колеса;
 5 - трехступенчатый ротор-метатель; 6 – гидромотор; 7 – лопатки;
 8 - скоба с лемехом; 9 - наклонные ножи; 10 - лоток-подъемник.

Рисунок 2.1 - Схема лесопожарной грунтометательной машины

Трёхступенчатый ротор метатель с лопатко-подъемниками представляет собой совокупность трёх дисков различного радиуса с закреплёнными на них лопатко-подъемниками определенной длины и ширины. В рабочем процессе почвогрунт выбрасывается из кожуха рыхлителя с высотой $h_{мет}$ над уровнем грунта с частотой вращения, определяемой конструктивными и технологическими параметрами гидромотора и насоса.

Под эффективностью обычно подразумевают ресурсосбережение, согласованность функциональных узлов и способность аппаратуры противостоять негативным факторам окружающей среды. Рентабельность включает оценку затрат, требуемых на реализацию, возможные прибыли и стратегические перспективы (например, увеличение длительности эксплуатации). Реализуемость же требует определенного практического опыта организации конструкторских работ, наличия базы элементарных операций системы решения и ресурсов, включающих длительность реализации.

2.2 Моделирование взаимодействия ротора-метателя с почвенной средой

2.2.1. Общая концепция построения формализованной модели

Целью данного раздела является формирование общей концепции формализованного моделирования конструктивных и технологических параметров ротора-метателя в рамках комплексного подхода с обоснованием ограниченного числа параметров физико-механических свойств почвогрунта, имеющих ясный физический смысл. На рисунке 2.2 представлена технология формализованного моделирования, отличающаяся от известного формального подхода пошаговым приближением модели к оригиналу.

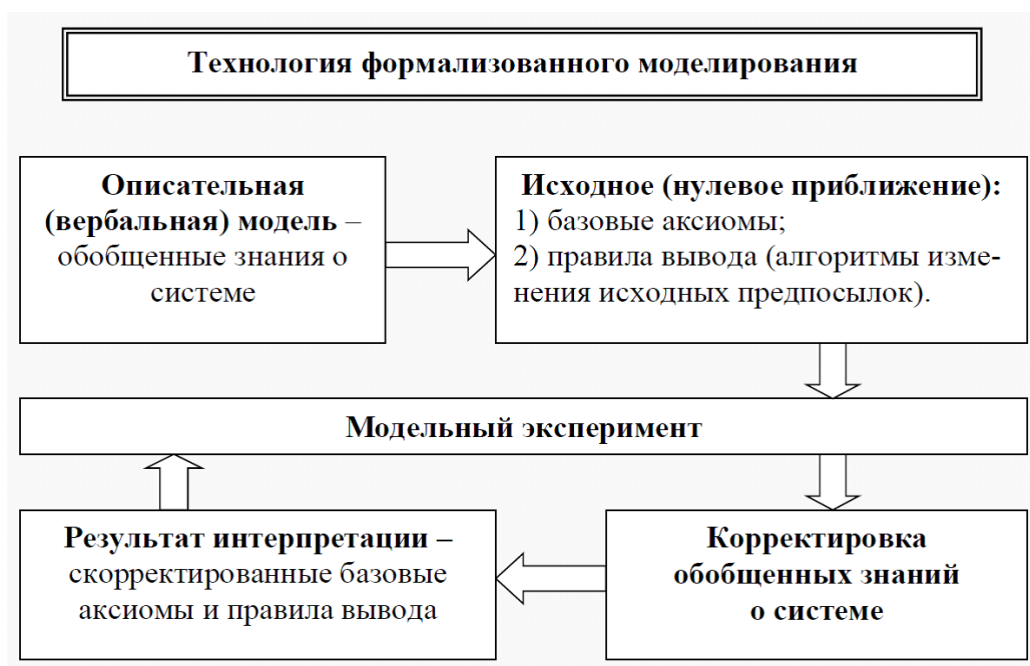


Рисунок 2.2. - Технология формализованного моделирования

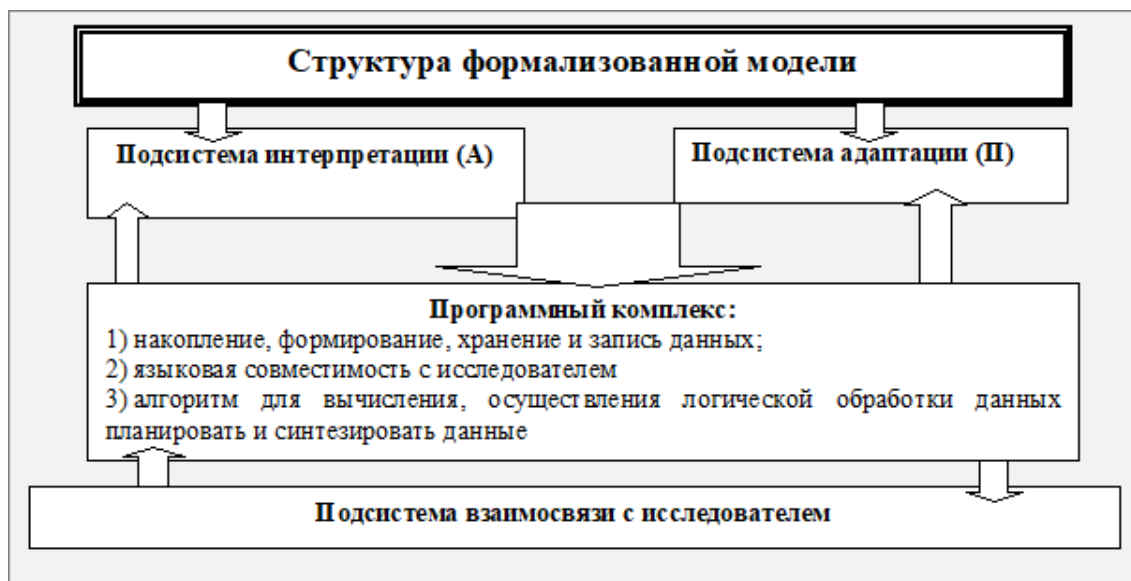


Рисунок 2.3 - Структура формализованной модели [3-6]

Последовательность формализованного моделирования разделяется на этапы:

- создание описательной модели ротора-метателя (основные элементы, их свойства и основные выполняемые ими операции) для формирования модели рабочего процесса (вербальное моделирование);

- формирование основных аксиом модели рабочего процесса для подсистемы интерпретации, содержащей базовые аксиомы (основополагающие уравнения движения ротора и почвогрунта), а также базы символьных выражений для реализации математических соотношений;

- определение правил конструирования формальных выражений и правил ввода и вывода основных характеристик рабочего процесса для подсистемы адаптации, по которым и будет формироваться принцип оптимизации рабочего процесса к условиям низового лесного пожара и влияния конструктивных и технологических параметров ротора-метателя и физико-механических свойств почвогрунта;

- учитывая сложности адаптации теоретических моделей и практики, необходимо постоянное развитие модели, процесс которого должен сохранять признаки реального рабочего процесса;

Для многокритериальной оценки эффективности конструктивных и технологических параметров ротора-метателя формализованная модель должна содержать, кроме перечисленных подсистем, программный комплекс, который непосредственно осуществляет вычислительный эксперимент, обязательно содержащий индикаторную подсистему рабочего процесса в фиксированный момент времени.

2.2.2 Обоснование общей концепции для формализованной модели ротора-метателя

Для формирования совокупности конструктивных и технологических параметров ротора-метателя в рамках комплексного подхода удобно использовать древесные графы. В рамках общего подхода любую техническую систему можно представить в виде совокупности трёх страт: рабочий процесс, управление, взаимодействие с внешней средой (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 - Древесный граф назначения технической системы

Каждый из стратов, в свою очередь, разбивается на крупные функциональные узлы (рисунок 2.5), которые делятся на менее крупные узлы вплоть до элементарных функциональных узлов, реализация которых известна (так называемые элементарные функциональные узлы). Со времён первых автоматических (механических) конструкций рабочий процесс реализуется с помощью рабочего органа, конструктивные и технологические параметры которого зависят от параметров двигателя, которые в свою очередь существенно зависят от принципа работы, состава и функциональных параметров системы ресурсозабора. Необходимо помнить, что на параметры рабочего процесса будет оказывать влияние согласованность элементной базы передаточно-возвратного механизма, определенный вклад вносят и системы экстренного управления, а также факторы влияния окружающей среды. Поэтому при создании вербальной модели необходимо определиться с составом технической системы в целом и формированием концепции обоснования существенных влияний на рабочий процесс других функциональных узлов.

Затем сбор формализованной модели начинается с определения параметров элементарных функциональных узлов. Таким образом совокупность конструктивных и технологических параметров осуществляется с учётом назначения формализованной модели. Каждый из элементов в программном комплексе представляет собой массив конструктивных и технологических параметров, определяющих динамику его функционального фактора в системе в режиме реального времени.

Таким образом, объектом теоретического исследования является рабочий процесс комбинационного ротора-метателя (рисунок 2.5).

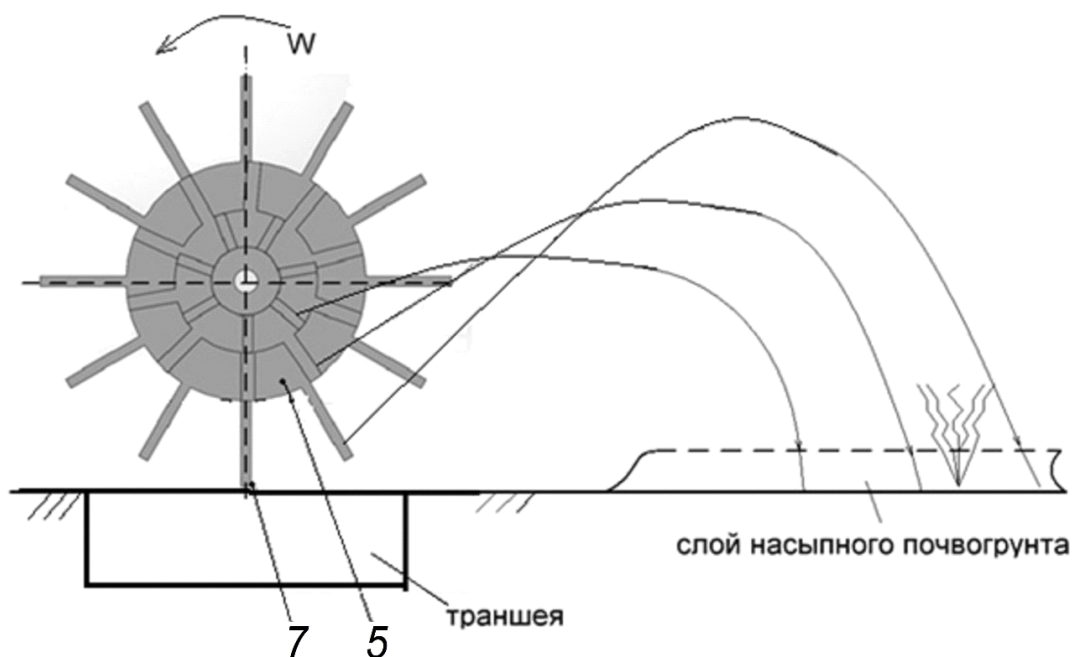


Рисунок 2.5 - Технологическая схема рабочего процесса ротора-метателя

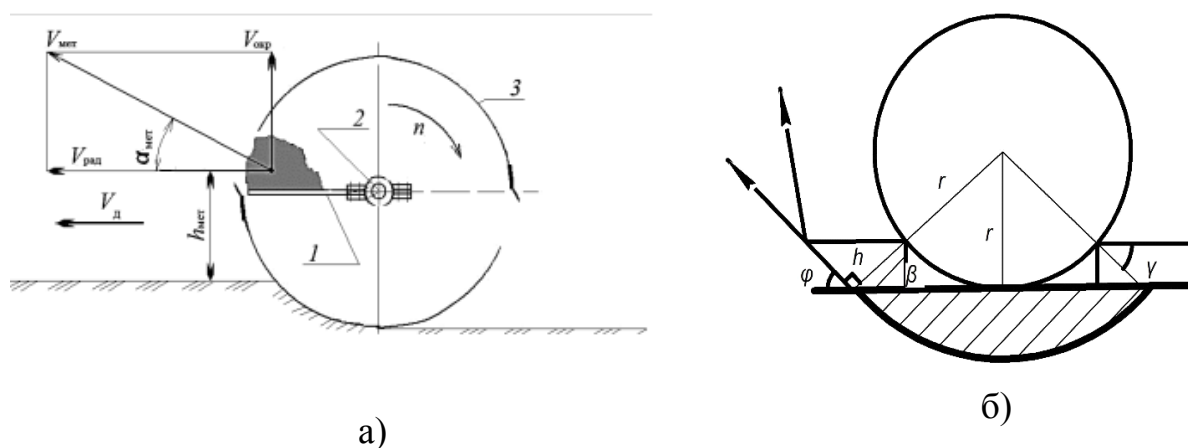
На уровне вербального моделирования конструктивными параметрами, определяемыми по результатам вычислительного эксперимента, трехступенчатого ротора-метателя являются радиусы дисков, длина лопатки и высота лотка-подъемника над уровнем грунта. Технологическими параметрами рабочего процесса являются частота вращения трехступенчатого ротора-метателя и угол вылета почвогрунта из кожуха.

2.2.3. Обоснование функциональных факторов модели, определяемых параметрами трёхступенчатого ротора-метателя

На этапе исходного нулевого приближения для формирования базовых аксиом необходимо определить функциональные параметры элементарных функциональных узлов моделируемой системы [6]. В нашем случае элементарными функциональными узлами, влияющими на исследуемый рабочий процесс, являются: гидромотор, насос и трёхступенчатый ротор-метатель. В рамках такого подхода функциональными факторами насоса являются: его объем (q_n), частота

вращения n ; коэффициент утечки a_y и начальное давление в системе гидронасоса p_0 . Именно эти параметры, влияют на формирование такого технологического параметра как скорость вращения ротора и величины установившегося давления в системе. Функциональными факторами в блоке гидромотора в базовой модели являются: его объем (q_m), полный и объёмный КПД (η_m, η_0), а также приведённый момент инерции гидромотора и комбинированного трёхступенчатого ротора-метателя ($J_{пр}$), который будет зависеть от конструктивных параметров (размеров дисков, лопаток и массы) рабочего органа исследуемого процесса.

Функциональные факторы трёхступенчатого ротора-метателя во многом будут определять вербальные представления о исследуемом процессе (рисунок 2.6).



а - схема рабочего процесса; 1 - лопатка метателя; 2 - вал со ступицей; 3 - кожух (n - частота вращения ротора-метателя); б - моделирование угла вылета почвогрунта при метании [13]

Рисунок 2.6 – Схема взаимодействия ротора-метателя с почвенной средой

Общий перечень функциональных факторов модели, состоящий из функциональных факторов гидромотора с насосом (объем (q_m), полный и объёмный

КПД (η_m, η_0) гидромотора, объем (q_n), частота вращения n_n ; коэффициент утечки a_y и начальное давление в системе гидронасоса p_0), приведённый момент инерции гидромотора и комбинированного трехступенчатого ротора-метателя ($J_{пр}$), конструктивные параметры ротора-метателя (радиусы дисков, ширина, длина и углы наклона лопаток), а также функциональные факторы, определяемые физико-механическими свойствами почвогрунта, учитывающими его возможную неоднородность (углы разброса грунта для каждого диска) и параметры для оптимизации модели к условиям низового лесного пожара (факторы сопротивления среды для каждого диска) (рисунок 2.7).

Согласно общим представлениям классической физики процесс метания почвогрунта в исследуемой системе можно моделировать как движение в поле тяжести под углом α к горизонту с начальной скоростью $V_{мет}$, определяемой скоростью вращения ротора с начальной высотой вылета $h_{мет}$ над уровнем грунта.

Радиусы дисков ступеней (R_i) и длина лопатки (L), а также скорость вращения ротора (ω) существенно влияют на скорость V_0 [14-15]. Если полагать, что центр тяжести почвогрунта находится примерно на середине лопатки, то начальная скорость вылета почвогрунта от i -ой ступени V_i определяется отношением:

$$V_i = \omega(R_i + 0.5L) \quad (2.1).$$

Параметр расчета	Значение
(01) Объем насоса , м3/об	0,000251
(02) Объем гидромотора, м3/об	0,000251
(03) Коэффициент утечек м5/с/Н	0,0000000001
(04) Частота вращения насоса, об/с	23
(05) Приведенный момент инерции гидромотора	16
(06) Полный КПД гидромотора	0,9
(07) Объемный КПД гидромотора	0,95
(08) Начальное давление гидронасоса	16000000
(09) Радиус диска R1, мм	100
(10) Радиус диска R2, мм	250
(11) Радиус диска R3, мм	400
(12) Радиус диска R4, мм	550
(13) Высота Н, мм	300
(14) Высота лопатки, мм	150
(15) Ширина лопатки, мм	150
(16) Количество лопаток 2, шт	6
(17) Количество лопаток 3, шт	9
(18) Количество лопаток 4, шт	12
(19) Высота над уровнем земли, м	0,3
(20) Угол наклона лопаток 2, град	0
(21) Угол наклона лопаток 3, град	55
(22) Угол наклона лопаток 4, град	78
(23) Угол разброса 2, град	10
(24) Угол разброса 3, град	10
(25) Угол разброса 4, град	10
(26) Начальная точка среды X0, м	3
(27) Соппротивление среды 2	0,1
(28) Соппротивление среды 3	0,1
(29) Соппротивление среды 4	0,1

Рисунок 2.7 - Параметры расчёта (функциональные факторы) в программном комплексе

В рамках такого подхода динамика движения частиц почвогрунта будет моделироваться в двух направлениях (X и Y) с учётом силы тяжести и силы сопротивления горизонтальному движению. Таким образом, траектория полёта почвогрунта, а также дальность выбрасывания, а, следовательно, и величина слоя выбрасывания будет определяться углом вылета в результате вращения ротора-метателя (рисунок 2.6, а). Величина этого угла тоже во многом определяется конструктивными и технологическими параметрами рабочего органа (рисунок 2.6, б):

$$\alpha_i = 0,5\pi - \arcsin \left(\frac{R_i}{(R_i+L)} \right) \quad (2.2)$$

При этом необходимо учитывать влияние физико-механических свойств почвогрунта, поэтому данный функциональный фактор не будет иметь одно-

значного значения, а распределится в некотором интервале в зависимости от того, к какому типу почвогрунт относится.

На угол вылета будет оказывать воздействие такой конструктивный параметр трёхступенчатого ротора-метателя, как угол наклона лопатки. С помощью этого угла можно управлять процессом формирования слоя высыпания.

В модели необходимо учитывать и влияние низового лесного пожара на движение почвогрунта в воздушной среде. С большой долей уверенности это влияние в модели будет реализовываться в увеличении силы сопротивления среды вблизи линии огня, что неминуемо приведёт к уменьшению скорости полёта частиц почвогрунта, поэтому необходимо ввести в модель факторы влияния среды полёта.

Таким образом, перед формированием базовых аксиом мы определили пространство функциональных факторов, имеющих ясный физический смысл, которые определяются конструктивными и технологическими параметрами исследуемой системы.

2.2.4. Математическое описание кинематики и динамики ротора-метателя при взаимодействии с почвогрунтом

Целью данного раздела является обоснование аксиоматики модели в области определения скорости вращения комбинированного ротора-метателя, позволяющей оценить дальность полёта грунта в зависимости от функциональных факторов, определенных в предыдущем разделе. В структуре формализованной модели выделяют подсистему адаптации и интерпретации. Первая система формирует правила корректировки базовых аксиом в соответствии соотнесения результатов вычислительного эксперимента и данных о реальном протекании исследуемых процессов. Вторая содержит аксиоматику модели, построенную из выбранных символьных элементов (модели) с учётом обоснованного синтаксиса базовых формульных выражений. В качестве выбранных символьных элементов целесообразно использовать функциональные факторы, обоснованные в

предыдущем разделе, поскольку они определяются конструктивными и технологическими параметрами исследуемой технической системы, имеют ясный физический смысл и могут быть использованы при формировании формульных соотношений для аксиом модели в рамках представлений классической физики.

2.2.5. Обоснование аксиом модели вращения трёхступенчатого ротора-метателя в рамках классической механики

В классической механике основным соотношением при моделировании процессов вращения является уравнение динамики, определяющее угловое ускорение ротора-метателя в зависимости от комбинированного момента вращения, определяемого конструктивными и технологическими параметрами лесопожарной грунтометательной машины [14-15]. В рамках такого подхода динамика вращения трёхступенчатого ротора-метателя описывается следующим формульным соотношением:

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{вр}} - \frac{1}{3} \mu \omega (R_i^3 - (R_i - h_{\text{мет}})^3) \quad (2.3),$$

где вращающий момент определяется функциональными факторами гидромотора, как $M_{\text{вр}} = \frac{\eta_n q_m p}{2\pi \eta_0}$ и давлением в системе, состоящей из гидронасоса и гидромотора; μ -коэффициент, определяемый согласованием элементов трёхступенчатого ротора. При этом давление в системе определяется из часто используемого гидродинамического соотношения:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{K_p} (q_n n_n - q_m \omega - a_y p) \quad (2.4),$$

$$\text{где } K_p = \frac{10^{-5}}{7,28p + 106}.$$

В первом приближении, при условии стационарности давления в системе, уравнение (2.) решается аналитически:

$$\omega = \omega_r (1 - (1 - K_\omega t / \omega_0) e^{-K_\omega t}) \quad (2.5),$$

где $K_\omega = \mu (R^3 - (R - H)^3) / (3J_{\text{пр}})$ определяется сопротивлением грунта и инерцией ротора, а $\omega_r = M_{\text{вр}} \omega_0 / (J_{\text{пр}} K_\omega)$ скоростью стационарного вращения ротора-метателя.

Поскольку с большой уверенностью можно утверждать, что длительность рабочего процесса ротора-метателя при тушении низового пожара значительно превосходит время релаксации давления в исследуемой системе, то скорость вращения будет определяться с учётом формульного соотношения для момента вращения как:

$$\omega \cong \omega_r = \frac{\eta_n q_m p \omega_0}{2\pi \eta_0 J_{пр} K_\omega} \quad (2.6),$$

т.е. величиной установившегося давления в системе. Тогда соотношение (2.5) с учётом (2.6) преобразуется в

$$\frac{dp}{dt} = (7.28p + 106)(K_\eta - K_\varepsilon p) \quad (2.7),$$

где введены обозначения $K_\eta = 10^5 q_{н.н.}$; $K_\varepsilon = 10^5 (\omega_r + a_y)$. Полученное соотношение является дифференциальным уравнением первого порядка, которое с начальным условием $p=p_0$ при $t=0$ решается аналитически и позволяет получить аксиоматическое соотношение для зависимости давления от времени в исследуемой системе:

$$p = \frac{p_1 - p_2 C(1 - e^{-At})}{(1 - C e^{-At})} \quad (2.8)$$

В полученном формульном соотношении введены следующие обозначения:

$$p_1 = \frac{106K_\varepsilon - 7,28K_\eta - \sqrt{(106K_\varepsilon - 7,28K_\eta)^2 + 3086,72K_\eta^2}}{14.56K_\varepsilon}$$

$$p_2 = \frac{106K_\varepsilon - 7,28K_\eta + \sqrt{(106K_\varepsilon - 7,28K_\eta)^2 + 3086,72K_\eta^2}}{14.56K_\varepsilon}$$

$$C = (p_0 - p_1) / (p_0 - p_2), A = 7,28K_\eta (p_1 - p_2) \quad (2.9).$$

Соотношение (2.8) с учётом (2.9) преобразуется в формульное соотношение для аксиомы модели, содержащей расчётную формулу для моделирования зависимости от времени скорости вращения ротора метателя:

$$\omega \cong \omega_r = \frac{\eta_n q_m p \omega_0}{2\pi \eta_0 J_{пр} K_\omega} \frac{p_1 - p_2 C(1 - e^{-At})}{(1 - C e^{-At})} \quad (2.10)$$

Полученные соотношения во многом определяются функциональными факторами исследуемой системы, конструктивными и технологическими параметрами ротора-метателя, получены в рамках моделей классической механики и используют функциональные факторы с ясным физическим смыслом.

Соотношение (2.1) с учётом (2.9) формирует аксиомы для расчёта начальных скоростей вылета частиц почвогрунта из траншеи вследствие вращения трехступенчатого ротора-метателя:

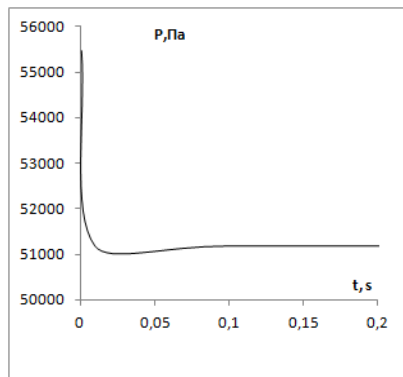
$$V_i = \frac{\eta_n q_m p \omega_0}{2\pi \eta_0 J_{пр} K_\omega} \frac{p_1 - p_2 C(1 - e^{-At})}{(1 - C e^{-At})} (R_i + 0.5L) \quad (2.11)$$

Из полученного соотношения очевидно, что скорости вылета почвогрунта от разных ступеней значительно различаются в силу различия таких конструктивных параметров ротора как радиусы дисков. Величины скоростей будут зависеть от такого конструктивного параметра ротора-метателя, как длина лопатки и функциональных факторов, определяющих влияние на процесс вращения технических характеристик гидронасоса и гидромотора. Таким образом, базовые аксиомы исходного приближения формируемой физико-математической модели определяются конструктивными и технологическими параметрами. При этом сформированы в рамках классической механики, а символьные термы (функциональные факторы) имеют ясный физический смысл [14-15].

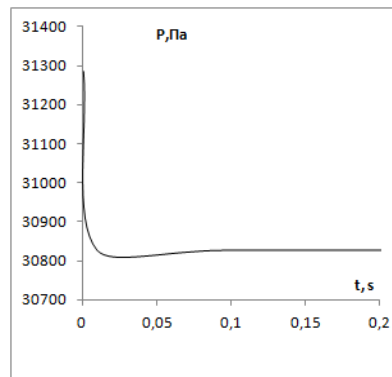
2.3 Результаты вычислительного эксперимента по определению давления в исследуемой системе и скорости вращения ротора-метателя

Подсистема адаптации в исходном приближении формализованной модели содержит алгоритмы изменения исходных предпосылок (правила ввода вывода) для корректировки базовых аксиом, с целью адаптации модели к реальной технической системе. Подобные алгоритмы при тестировании модели ещё не имеют чёткого формального представления, поэтому осуществляются вручную с

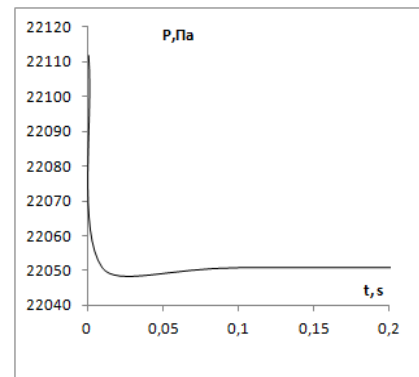
целью убедиться в адекватности модели, определить значимость используемых функциональных факторов и пределы их изменения. С этой целью были проведены вычислительные эксперименты по определению давления в системе для различных значений функциональных параметров гидромотора и гидронасоса (рисунок 2.8-2.11)



а) $q_n = q_m = 0,151$ л

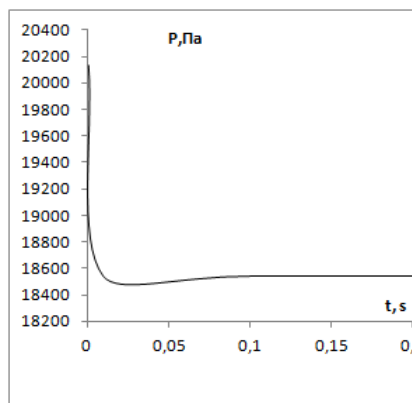


б) $q_n = q_m = 0,251$ л

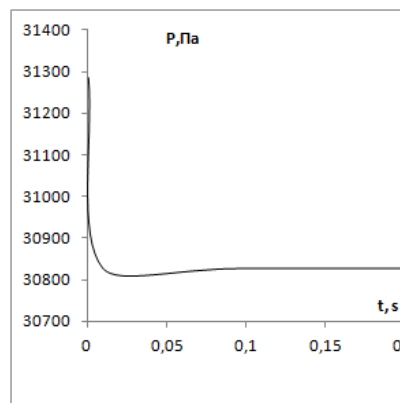


в) $q_n = q_m = 0,351$ л

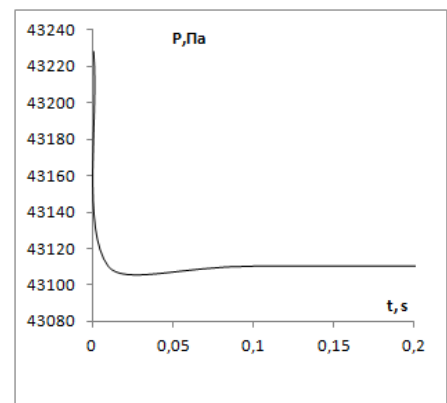
Рисунок 2.8 – Зависимости давления рабочей жидкости от времени для различных объемов насоса q_n и гидромотора q_m .



а) $q_m = 0,151$ л,
 $q_n = 0,251$ л

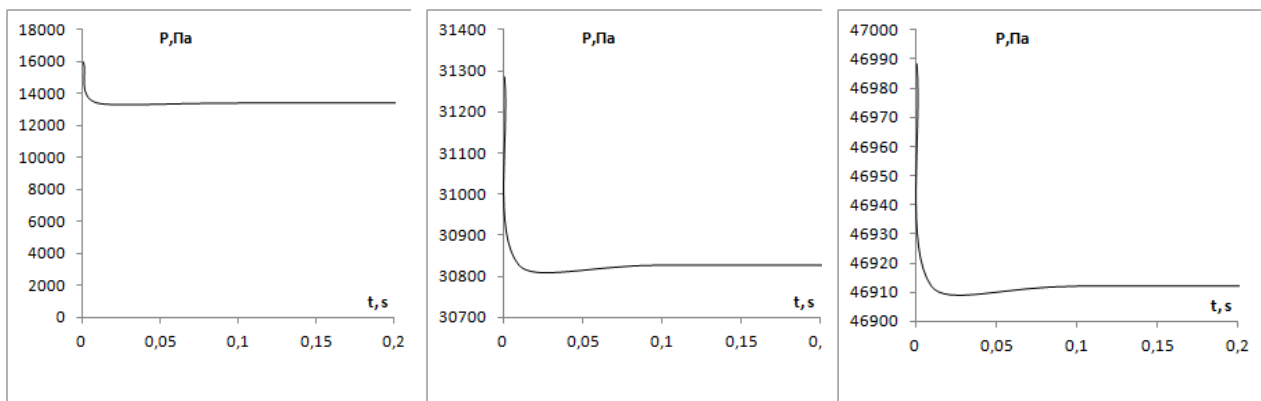


б) $q_m = 0,251$ л,
 $q_n = 0,251$ л



в) $q_m = 0,351$ л,
 $q_n = 0,251$ л

Рисунок 2.9 - Зависимости давления рабочей жидкости от времени для различных объемов насоса q_n и гидромотора q_m .



а) $n_H=10$ об/с

б) $n_H=23$ об/с

в) $n_H=35$ об/с

Рисунок 2.10 - Зависимости давления рабочей жидкости от времени для различной частоты вращения насоса n_H .

Результаты экспериментов показали, что время установления практически постоянного давления в системе не превышает 0,01 с, что значительно меньше (практически в 10 раз) времени оборота ротора-метателя (около 0,3 с).

Таким образом, базовое предположение о малости времени релаксации подтвердилось модельным экспериментом, следовательно базовые аксиомы модели вращения можно считать достаточно адекватными к реальным процессам.

Затем выяснилось, что величина стационарного давления в исследуемой системе незначительной величины времени релаксации практически не зависит от начального давления в насосе, но значительно уменьшается в процессе релаксации. Исследование значимости функциональных факторов гидромотора и гидронасоса выявили следующие закономерности.

При равенстве объёмов гидромотора и насоса давление стационарное и давление в системе уменьшается с ростом величины объёма (рисунок 2.9 (а, б, в)). В случае же если объём гидромотора отличается от объёма насоса, то стационарное давление увеличивается (рисунок 2.10 (а, б, в)).

Интересен тот факт, что вычислительный эксперимент по влиянию функциональных факторов на скорость вращения показал несколько иные результа-

ты. Например, в случае равенства объёмов гидромотора и насоса скорость вращения не меняется с ростом этих функциональных факторов (рисунок 2.11 (а, б, в)).

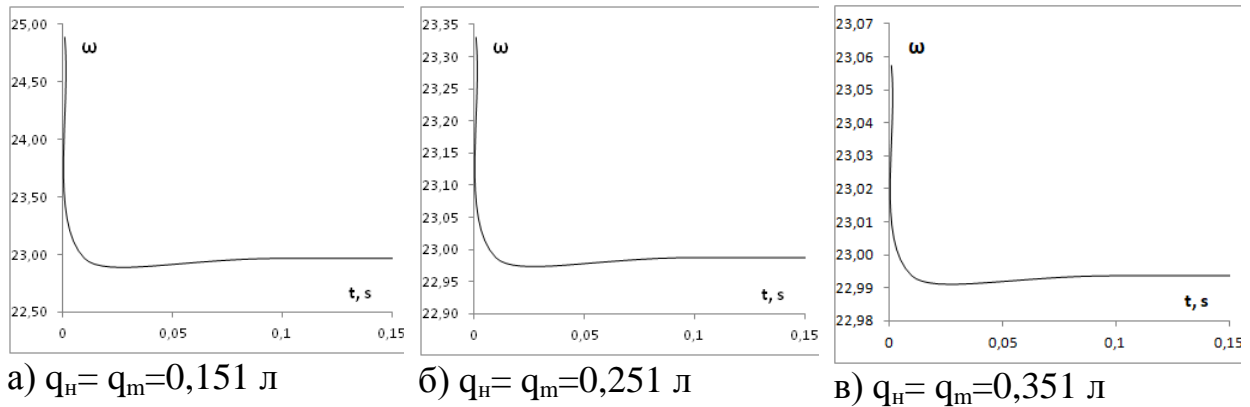


Рисунок 2.11 - Зависимости частоты вращения ротора от времени для различных объемов насоса q_n и гидромотора q_m .

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента подтверждают адекватность базовых предположений и позволяют исследовать зависимости скорости вращения ротора-метателя и давления в системе от функциональных факторов гидромотора и насоса.

2.4. Моделирование зависимости дальности полёта почвогрунта от конструктивных и технологических параметров ротора метателя

Траекторию полета частицы грунта определяем по формулам:

$$x(t) = V_{\text{мет}} t \cos(\alpha)$$

$$y(t) = h_{\text{мет}} + V_{\text{мет}} t \sin(\alpha) - \frac{gt^2}{2} \quad (2.12)$$

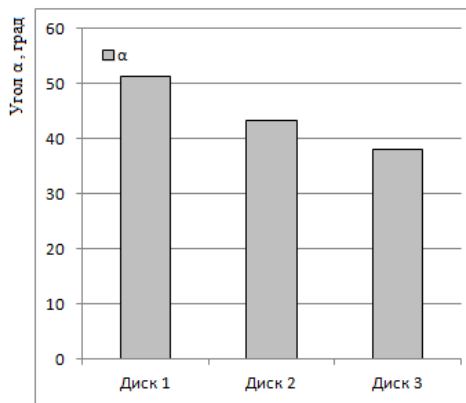
Для определения длительности полёта почвогрунта τ нами получено модельное соотношение:

$$\tau = \frac{V_{\text{мет}} \sin(\alpha) + \sqrt{(V_{\text{мет}} \sin(\alpha))^2 + 2gh_{\text{мет}}}}{g} \quad (2.13)$$

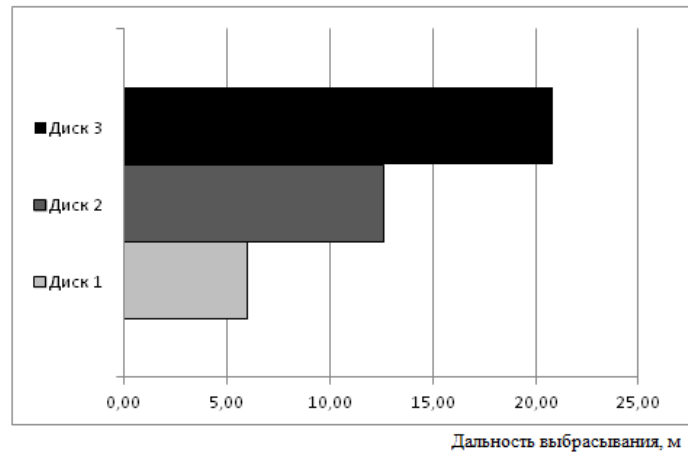
Принимая во внимание выражение 2.1.10 дальность метания:

$$S = V_{\text{мет}} \frac{V_{\text{мет}} \sin(\alpha) + \sqrt{(V_{\text{мет}} \sin(\alpha))^2 + 2gh_{\text{мет}}}}{g} \cos(\alpha) \quad (2.14)$$

Результаты вычислительного эксперимента по определению угла вылета почвогрунта (а) и дальности выбрасывания грунта (б) с нулевым углом наклона лопатки представлены на рисунке 2.12.



а) угол вылета почвогрунта

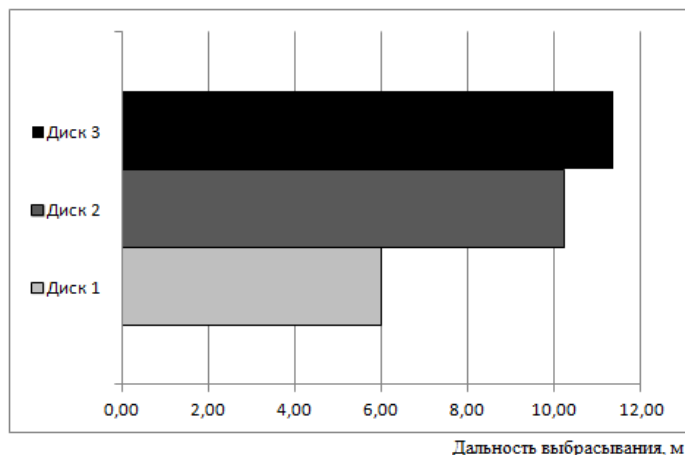
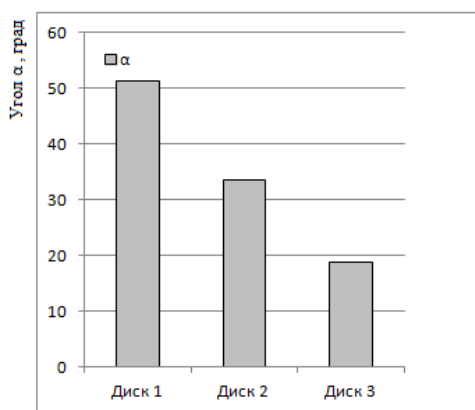


б) дальность выбрасывания грунта

Рисунок 2.12 - Результаты вычислительного эксперимента при нулевом угле наклона лопатки

Результаты вычислительного эксперимента показывают, что величины углов метания почвогрунта находятся вблизи 45° , при этом разброс примерно от 35° для третьего диска до 51° для первого диска (рисунок 2.12 а). Однако разброс почвогрунта от различных дисков составляет более 10 метров (рисунок 2.12_б).

Результаты вычислительного эксперимента по определению угла вылета почвогрунта (а) и дальности выбрасывания грунта (б) с комбинированным углом наклона лопатки представлены на рисунке 2.13.



а) угол вылета почвогрунта

б) дальность выбрасывания грунта

Рисунок 2.13 - Результаты вычислительного эксперимента при комбинированном угле наклона лопатки

Чтобы изменить разброс грунта от дисков ротора-метателя вводим комбинированный угол наклона лопаток γ . При различных его значениях разброс существенно уменьшается или увеличивается (рисунок 2.13 б). Комбинации для угла и скорости метания определяются по формулам (2.11) и (2.14):

$$\alpha_i = 0,5\pi - \arcsin\left(\frac{R_i}{(R_i + L\cos(\gamma))}\right) \quad (2.15)$$

$$V_i = \omega(R_i + 0.5L\cos(\gamma)) \quad (2.16).$$

Изменение угла наклона лопатки в случае первого диска, согласно вычислительному эксперименту, приводит лишь к уменьшению дальности полёта, поэтому целесообразно оставить его нулевым, тогда как увеличение угла наклона у других дисков приводит к уменьшению дальности метания и сокращению разброса грунта в слое выбрасывания. Необходимо понимать, что корректировка аксиом приводит к изменению величин углов метания для дисков.

2.5 Результаты вычислительного эксперимента по определению траектории движения в процессе метания почвогрунта с учетом конструктивных параметров ротора

Траектория полета частиц грунта является важной кинематической характеристикой. Выходной характеристикой выбрана функция $y(x)$ в дискретные моменты времени t_j , число которых определяется шаговым интервалом моделирования (0,01 с)

$$x_i(t_j) = \begin{cases} V_i t_j \cos(\alpha_i), & \text{при } y(t_{j-1}) > y_{min} \\ x_i(t_{j-1}), & \text{при } y(t_{j-1}) < y_{min} \end{cases}$$

$$y_i(t_j) = \begin{cases} h_i + V_i t_j \sin(\alpha_i) - \frac{gt_j^2}{2}, & \text{при } y_i(t_{j-1}) > 0 \\ 0, & \text{при } y_i(t_{j-1}) < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

В этих соотношениях $i=1,2,3$ – номер диска ротора-метателя, соответственно угол и скорость метания почвогрунта моделируются соотношениями:

$$\alpha_i = 0,5\pi - \arcsin\left(\frac{R_i}{(R_i + L \cos(\gamma_i))}\right) \quad (2.16)$$

$$V_i = \omega(R_i + 0.5L \cos(\gamma_i)) \quad (2.17)$$

При этом h_i – высота метания для каждого диска определяется согласно конструктивным параметрам ротора-метателя из таблицы 2.1, рассчитанной из величины радиусов ступеней ротора-метателя.

Таблица 2.1 - Конструктивные параметры ротора метателя

Номер диска i	1	2	3
h_i , м	0,6 м	0,45 м	0,3 м
γ_i	51	33	19

На рисунке 2.14 приведены траектории полета частиц грунта при радиальном положении лопаток. Для уменьшения разброса частиц грунта были рассчитаны углы установки лопаток относительно радиального положения (таблица

2.1). Траектории полета частиц грунта при комбинированных углах установки лопаток приведены на рисунке 2.15.

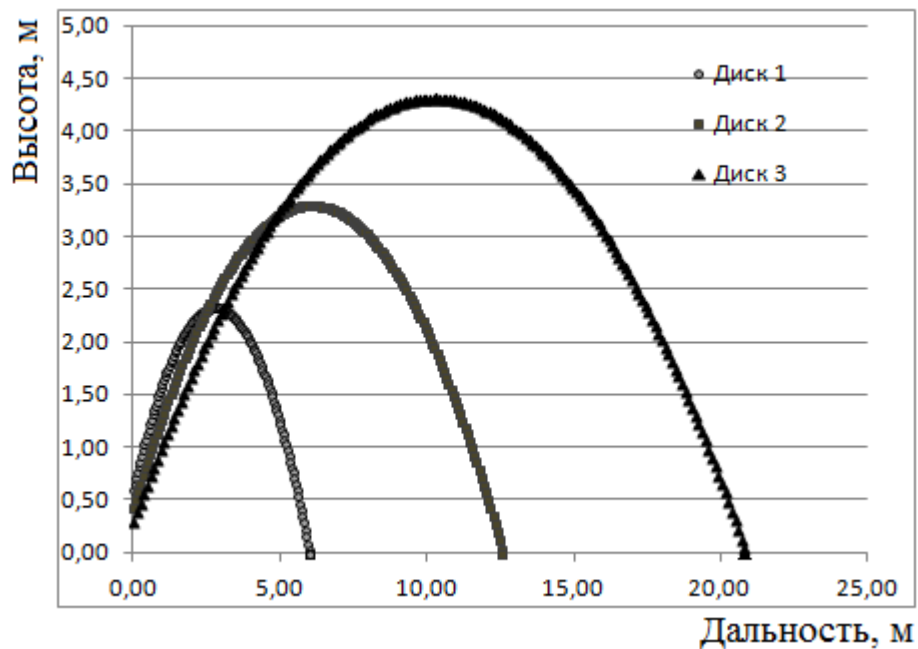


Рисунок 2.14 - Траектории движения частиц грунта при нулевом угле наклона лопатки.

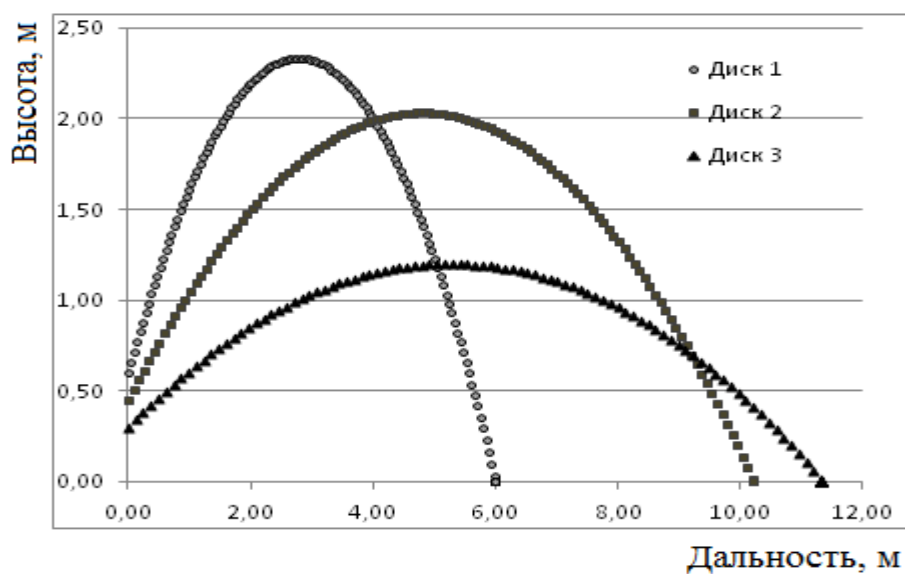


Рисунок 2.15 - Траектории движения частиц грунта при комбинированном угле наклона лопатки.

Таким образом, рекуррентные соотношения для имитационного моделирования траекторий полёта почвогрунта при метании трёхступенчатым ротором-метателем сформированы в рамках классической механики.

2.6 Траектории движения в процессе метания с учётом физико-механических свойств почвогрунта

Физико-механические свойства почвогрунта в предлагаемой модели будут учтены с использованием метода частиц [16-24]. Для определения доли разброса в слое выбрасывания, вызванного особенностями адгезионных и адсорбционных свойств почвогрунта, используем конечную сумму:

$$\delta(x) = \sum_{i=1}^3 \Delta_i \sum_{k=1}^N P(\alpha_{ik}) \varepsilon_{Ik}(\max(x_{ik}) - s_k) \quad (2.18),$$

В данном соотношении $\varepsilon_{Ik}(\max(x_{ik}) - s_k)$ - функция принадлежности определённому интервалу слоя, величиной s_k , Δ_i -доля почвогрунта, выбрасываемого i -ым диском ротора-метателя. Функция $P(\alpha_{ik})$ определяется базовыми предположениями модели о функциональных факторах, характеризующих влияние физико-механических свойств почвогрунта на кинематические параметры рабочего процесса ротора-метателя. Для обоснования модели можно использовать тот факт, что в основе всего разнообразия бессеточных методов [16-27] лежит концептуальный подход метода частиц [27]. Поэтому при применении данного подхода к исследуемой задаче вместо Дельта-функции используем функцию принадлежности интервалу $\varepsilon_{Ik}(\max(x_{ik}) - s_k)$ и определим для каждой частицы вероятностный вес, который будет определяться, например, функцией нормального распределения.

Физический смысл $P(\alpha_{ik})$ связан с тем, что угол метания каждой частицы ротором-метателем будет принадлежать интервалу $[\alpha_i; \alpha_i + \Delta\alpha_i]$, причём величина разброса будет различаться для дисков, поскольку адгезионные и адсорбци-

онные свойства грунта могут носить слоистый характер. Таким образом, получаем формульное соотношение для весового коэффициента $P(\alpha_{ik})$:

$$P(\alpha_{ik}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\alpha_{ik}-\alpha_i-\Delta\alpha_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.19)$$

Параметр $\sigma = \sqrt{N}$, где N – число частиц в бессеточном методе, которое закреплено в программе ($N=20$). При однородном почвогрунте вероятностный вес числа частиц при $\Delta\alpha=10^\circ$ максимален при углах метания $\alpha_i+\Delta\alpha_i$ (рисунок 2.15). Причём при таком сценарии средний диск будет выбрасывать большую часть почвогрунта (более 12%) по траектории с максимальной дальностью.

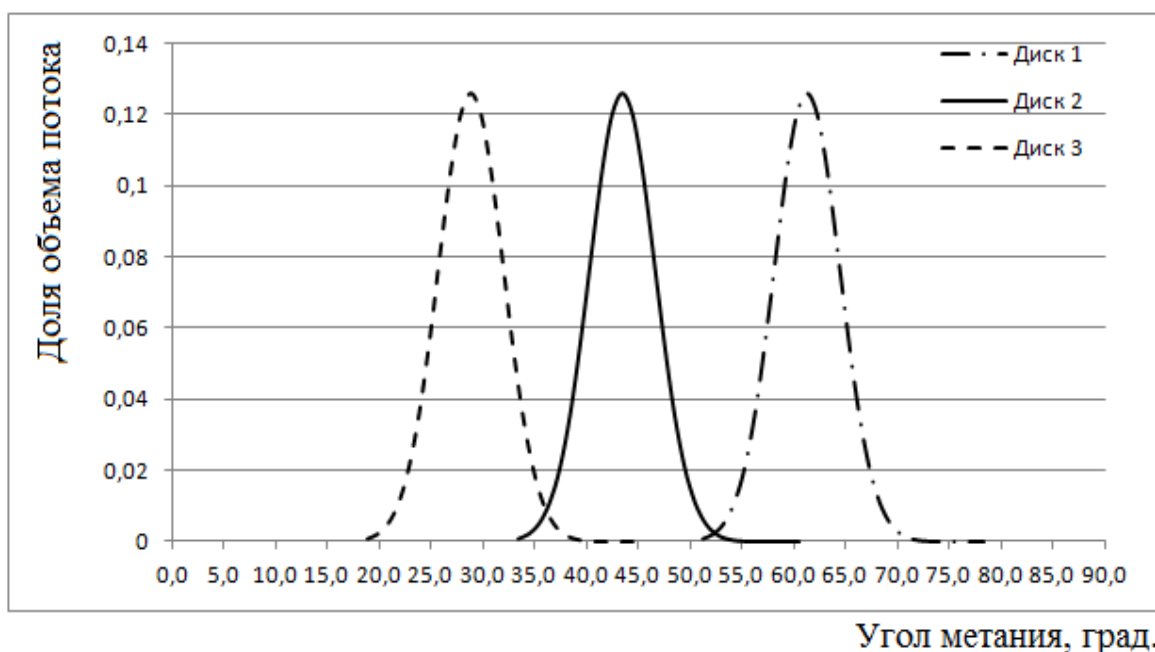


Рисунок 2.16 – Графики распределения однородного почвогрунта по углам метания для различных дисков ротора

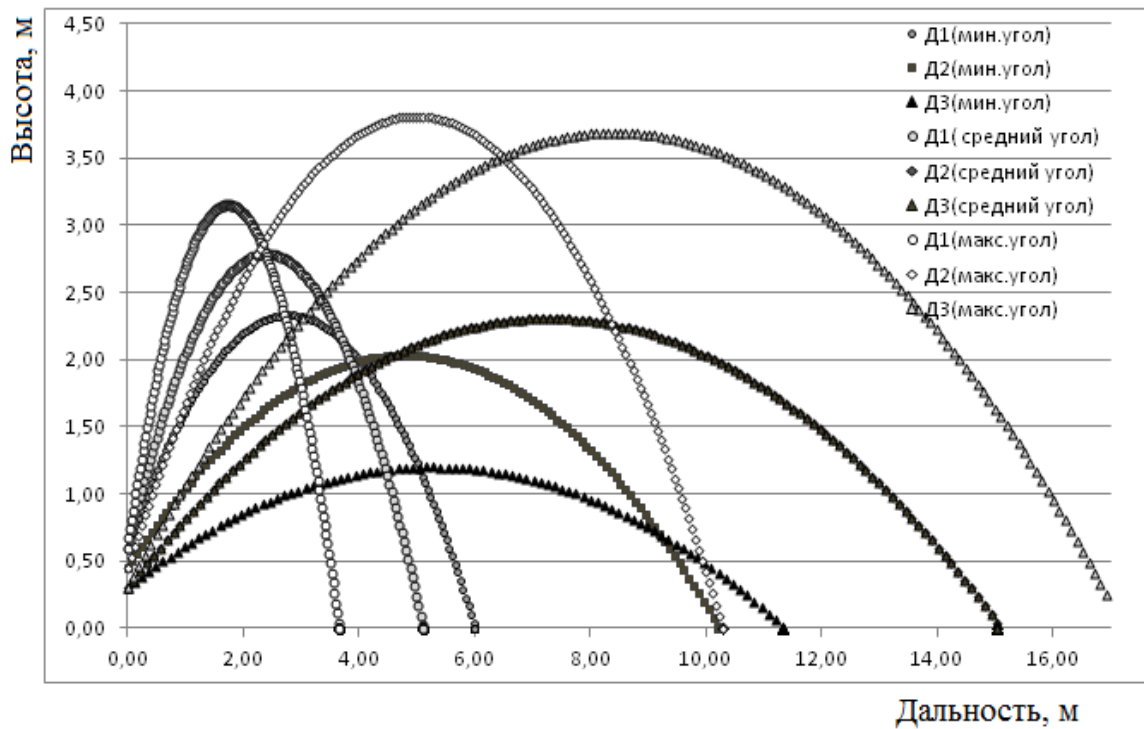


Рисунок 2.17 - Траектории движения частиц однородного грунта с учётом угла разброса.

Модель позволяет учитывать однородность грунта, выбрасываемого лопатками ротора. Это достигается изменением угла разброса частиц грунта от каждого диска с лопатками (рисунок 2.17).

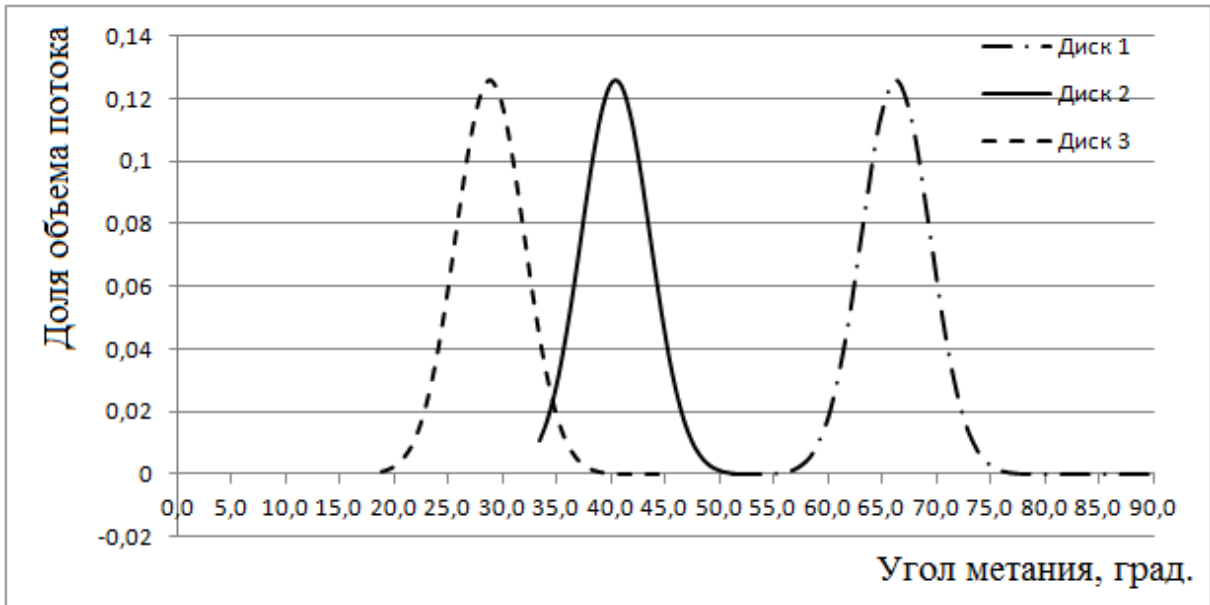


Рисунок 2.18 - Графики распределения неоднородного почвогрунта по углам метания для различных дисков ротора

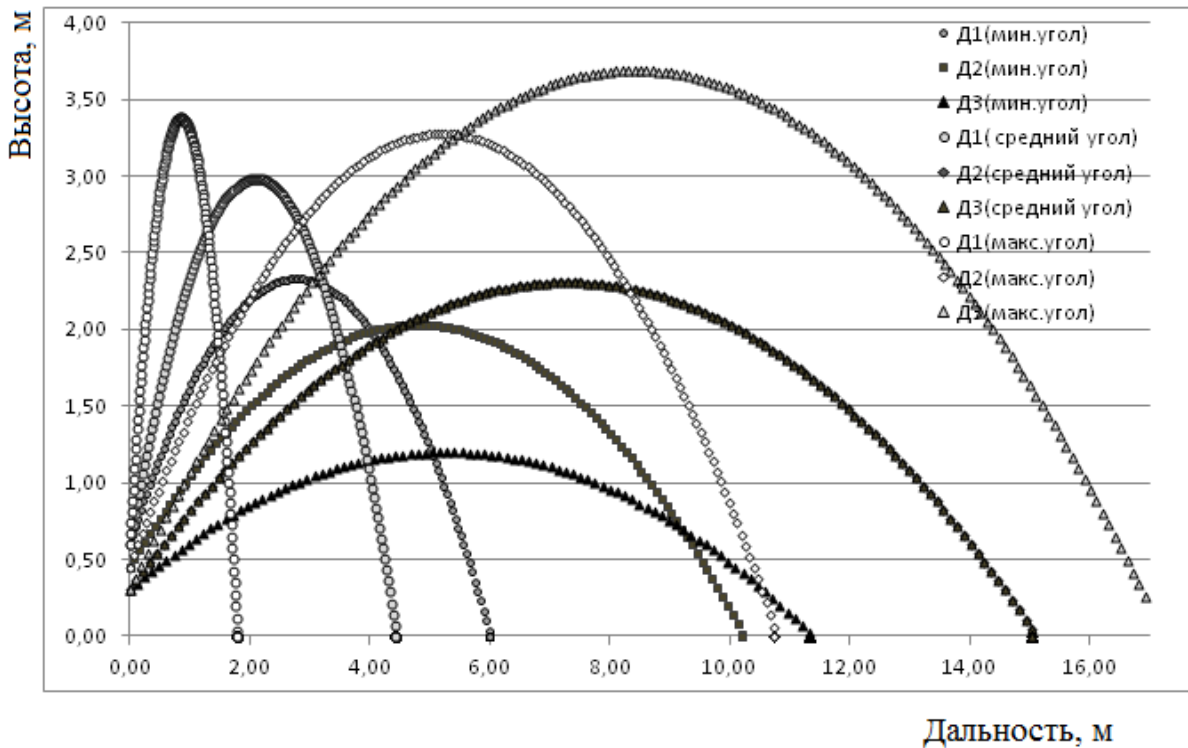


Рисунок 2.19 - Траектории движения частиц неоднородного грунта с учётом угла разброса.

Например, если средний диск попадает на глинозёмы, разброс его угла метания становится меньше и распределение вероятности смещается в сторону меньших углов (рисунок 2.19), что сказывается на разбросе траекторий движения частиц (рисунок 2.18, квадратики). К тому же если при этом первый диск оказался в области пылевого почвогрунта, то разброс углов для него увеличивается, что приводит к существенному расширению слоя высыпания (рисунок 2.18, кружки). Таким образом, функциональный фактор разброса угла метания в модели характеризует физико-механические свойства почвогрунта при адгезии частиц к поверхности лопатки и друг к другу. К сожалению, в классической физике нет концептуальных подходов, дающих функцию зависимости величины разброса угла метания. Однако, используя метод подобия, можно предложить методом макетирования определить разброс для такого почвогрунта, как песок $\Delta\alpha_0$ и оценивать для других грунтов по соотношению:

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_0 \frac{K_a}{K_s}$$

В предлагаемом соотношении коэффициенты K_a K_s являются отношением адгезионных и адсорбционных свойств почвогрунта к подобным константам для песка. Впрочем, подобный подход не является достаточно обоснованным. Поэтому разброс углов метания уместнее определять на практике корректируя соотношения величину $\Delta\alpha$ для каждого вида почвогрунта.

2.7 Моделирование распределения почвогрунта в слое выбрасывания

В результате корректировки базовых аксиом с помощью соотношения (2.1) программный комплекс может рассчитать распределение доли выбрасываемого грунта в слое. В используемом соотношении Δ_i в приближении пренебрежимо малых флуктуаций плотности почвогрунта в заборе определяется как отношение объёма грунта, выкидываемого каждым диском к полному объёму, выбрасываемому ротором-метателем. В рамках такого подхода, считая

диски идеальными цилиндрами, можно оценить полный объем выбрасываемого почвогрунта как:

$$V_0 = \pi H_D (R_3^2 - R_0^2) \quad (2.20)$$

Тогда объёмы, выбрасываемые каждым диском, определяются соответственно:

$$V_1 = \pi H_D (R_1^2 - R_0^2); V_2 = \pi H_D (R_2^2 - R_1^2); V_3 = \pi H_D (R_3^2 - R_2^2) \quad (2.21)$$

Тогда искомая доля грунта будет определяться соотношением:

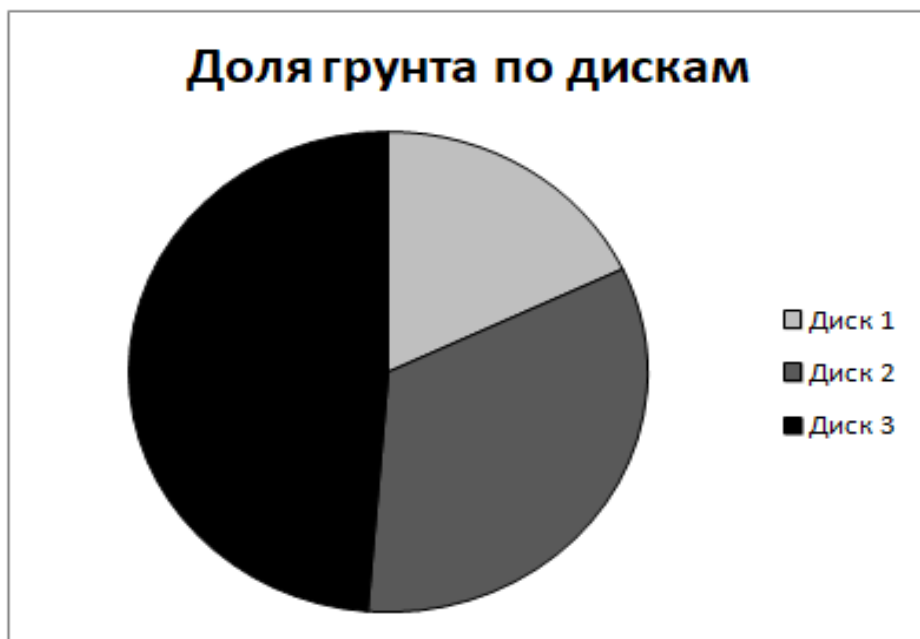


Рисунок 2.20 - Результаты вычислительного эксперимента по моделированию распределения доли выбрасываемого почвогрунта по дискам.

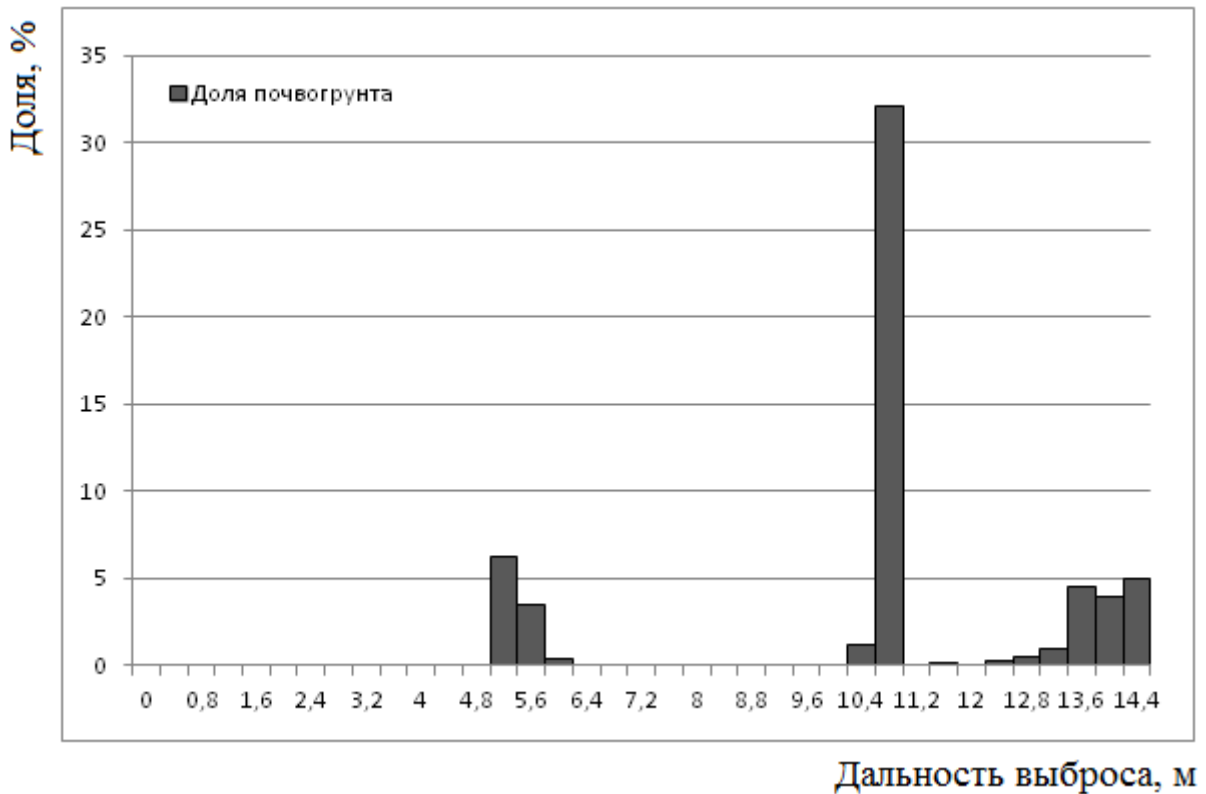


Рисунок 2.21 - Распределение выбрасываемого грунта в слое.

$$\Delta_i = \frac{V_i}{V_0} = \frac{R_i^2 - R_{i-1}^2}{R_3^2 - R_0^2} \quad (2.22)$$

От конструктивных параметров ротора зависит объем грунта, выбрасываемый каждым из дисков. Большая часть грунта выбрасывается третьим, самым большим диском, а меньшая – первым (рисунок 2.20). Согласно вычислениям более 30% грунта выбрасывается на расстояние 10,4-11,2 м (рисунок 2.21).

2.8. Оптимизация формализованной модели

Целью раздела является оптимизация вычислительного эксперимента по определению критериев эффективности рабочего процесса трёхступенчатого

ротора-метателя. Объектом исследования будут кинематические параметры процесса метания грунта.

При моделировании рабочего процесса ротора-метателя было выявлено, что скорость вращения и конструктивные параметры ротора влияют на траектории полета грунта, на формирование выбрасываемого слоя и на распределение грунта в слое (рисунок 2.22 и рисунок 2.23).

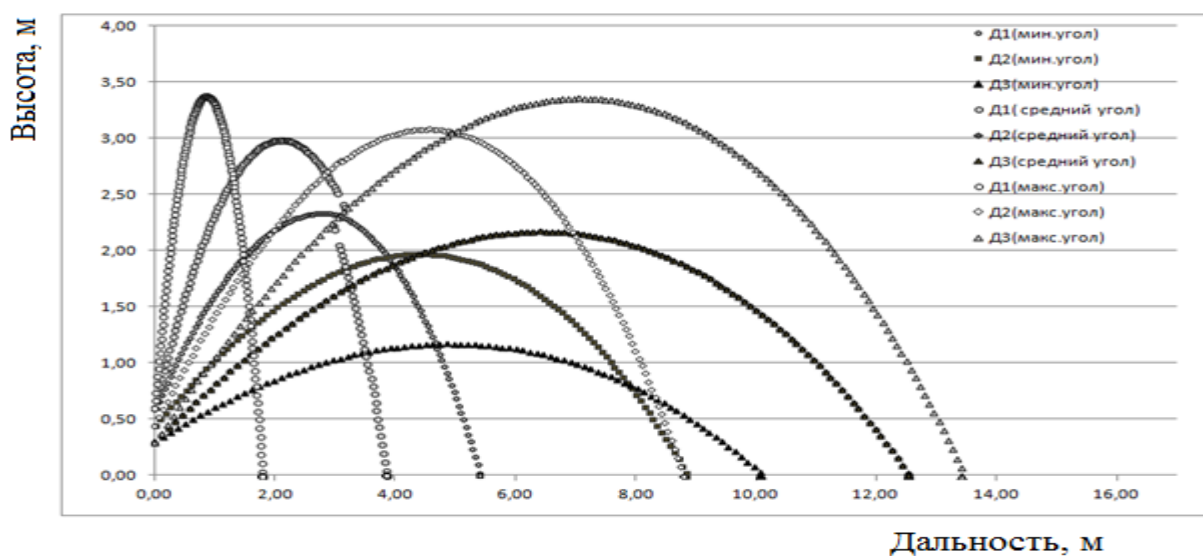


Рисунок 2.22 - Траектории движения частиц грунта с учётом оптимизации кинетических и динамических параметров.

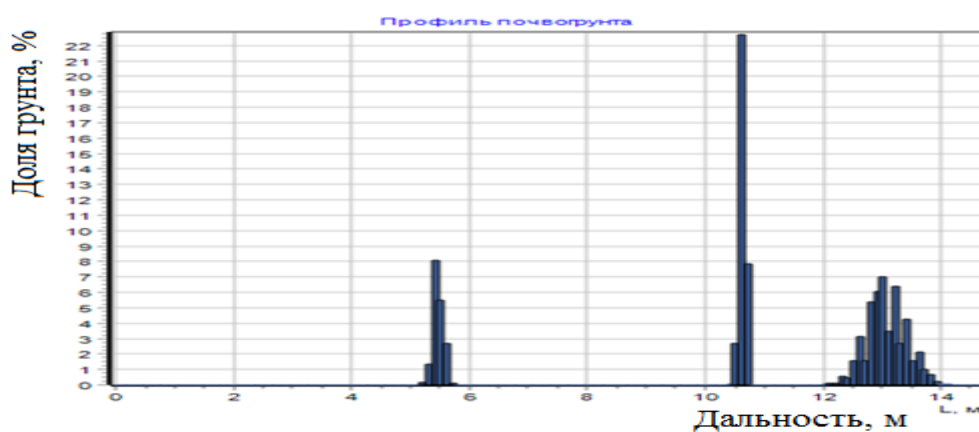


Рисунок 2.23 - Распределение почвогрунта в слое выбрасывания с учётом оптимизации кинетических и динамических параметров.

Сформирована базовая концепция для многокритериальной оптимизации параметров ротора-метателя при выявленных закономерностях.

Существенное влияние на траектории полета частиц грунта оказывает скорость вращения ротора-метателя, которая зависит от технических характеристик гидронасоса и гидромотора привода ротора.

Критериями для оптимизации параметров трёхступенчатого ротора-метателя были выбраны толщина слоя высыпания от каждой ступени, общая толщина слоя грунта и дальность метания.

Для каждой траектории координата x определяется по формуле:

$$x_{ik}(t_j) = \begin{cases} V_i t_j \cos(\alpha_{ik}), & \text{при } y_{ik}(t_{j-1}) > y_{min} \\ x_{ik}(t_{j-1}), & \text{при } y_{ik}(t_{j-1}) < y_{min} \end{cases} \quad (2.29).$$

Полосу выбрасывания определим по формуле:

$$S_i = \max(x_{ik}) - \min(x_{ik})$$

Тогда полная величина слоя выбрасывания:

$$S_0 = \max(x_{3k}) - \min(x_{1k}) \quad (2.30).$$

При этом долю грунта, выбрасываемого каждым диском, можно определить, используя соотношение как:

$$\delta_i = \Delta_i \cdot 100 \sum_{k=1}^N P(\alpha_{ik}) \varepsilon(\max(x_{ik}); \min(x_{ik})) \quad (2.31),$$

где ε - функция принадлежности к полосе выбрасывания диска.

Введем критерий эффективности - доля Ω выбрасываемого лопатками грунта из кожуха, поперечным сечением O в единицу времени в процентах, с учётом скорости движения трактора (V_T). Принимаем, что порция грунта на лопатке имеет форму правильной пирамиды с высотой, равной ширине лопатки D . Тогда:

$$\Omega = \frac{\omega L D^2 (N_1 + N_2 + N_3)}{6 \pi O V_T} \quad (2.33)$$

Реализовать многокритериальную оптимизацию с использованием численных методов можно, например, используя метод сравнения альтернатив Саати [31-35].

2.9. Сравнительные исследования параметров оптимизации процесса выброса грунта ротором-метателем по результатам вычислительного эксперимента

Параметрами выбора оптимальной конструкции ротора метателя были выбраны дальность полета грунта, ширина полосы выброса ($\Delta\Omega$) и высота выбрасываемого грунта (ΔH), поскольку перед разработчиками стояла задача кучного выброса грунта на наиболее дальнее расстояние. Вычислительный эксперимент проводился для трех модификаций ротора-метателя. Исходными радиусами для первой ступени были $R_1 = 310$ мм, для второй радиус $R_2 = 330$ мм, для третьей радиус $R_3 = 350$ мм, при этом ступенчатость исходного ротора равна 60 мм, условно обозначен R-60. При увеличении радиусов первой и второй ступеней ротора на 40 мм и 20 мм ступени между дисками становились соответственно 20 мм и 40 мм (R-20, R-40).

В таблице 2.2 представлены уровни и интервалы варьирования факторов, в таблице 2.3 план эксперимента, теоретические значения параметров.

Таблица 2.2. Определение уровней и интервалов варьирования факторов.

Фактор		Уровни факторов			Интервал варьирования	
Наименование	Обозначение	Верхний	Основной	Нижний		
Скорость вращения, об/с	$n(x_1)$	X_1	20	15	12	4
Высота лопаток, мм	$h(x_2)$	X_2	60	40	20	20

Таблица 2.3 План эксперимента, теоретические значения параметров

№	Частота вращения ротора, об/с	Высота ступеней ротора мм	Дальность метания каждой ступенью ротора, м			Ширина полосы насыпи грунта, м	Толщина слоя насыпи грунта, м
	X_1	X_2	Y_1			Y_2	Y_3
1	-1 (12)	1 (60)	1,20	1,60	2,10	0,90	0,07
2	0 (15)	1 (60)	1,75	2,40	3,10	1,35	0,04
3	1 (20)	1 (60)	2,90	4,10	5,40	2,50	0,02
4	-1 (12)	0 (40)	1,30	1,55	1,75	0,45	0,13
5	0 (15)	0 (40)	1,90	2,30	2,65	0,75	0,08
6	1 (20)	0 (40)	3,20	3,80	4,55	1,35	0,04
7	-1 (12)	-1 (20)	1,25	1,30	1,40	0,15	0,40
8	0 (15)	-1 (20)	1,80	1,95	2,05	0,25	0,24
9	1 (20)	-1 (20)	3,00	3,30	3,50	0,50	0,12

На рисунке 2.24 представлено распределение дальностей выброса грунта от дисков (Диск1, Диск2 и Диск3) ротора метателя R-20 при угловых скоростях вращения: $n=12, 15$ и 20 об/с, а в таблице 2.4 даны числовые данные дальности выброса грунта дисками.

Таблица 2.4 - Дальность выброса грунта дисками ротора-метателя R-20

Дальность метания, м			
Скорости, об/с	Диск 1	Диск 2	Диск 3
12	1,25	1,3	1,4
15	1,8	1,95	2,05
20	3	3,3	3,5

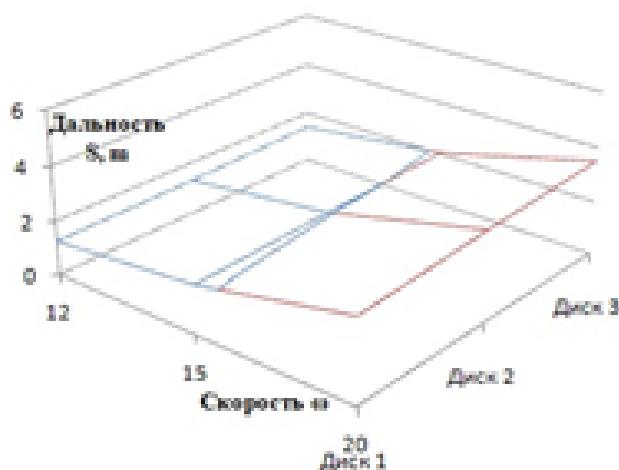


Рисунок 2.24 - Дальность выброса грунта дисками ротора-метателя R-20

Для ротора R-20 при изменении высоты ступеней лопаток на 20 мм при изменении частоты вращения 12 до 20 об/с дальность вылета грунта с диска1 изменялась от 1,25 до 3 м. Для диска 2 при изменении частоты вращения с 12 до 20 об/с дальность вылета грунта изменялась от 1,3 до 3,3 м. Для диска 3 при изменении частоты вращения с 12 до 20 об/с дальность вылета изменялась от 1,4 до 3,5 м.

На рисунке 2.25 представлено распределение дальностей выброса грунта от дисков (Диск1, Диск2 и Диск3) ротора метателя R-40 при частоте вращения:

$n=12,15$ и 20 об/с, а в таблице 2.5 даны числовые данные дальности выброса грунта дисками.

Таблица 2.5 - Дальность выброса грунта дисками ротора-метателя R-40

Дальность метания, м			
Скорости, об/с	Диск 1	Диск 2	Диск 3
12	1,3	1,55	1,75
15	1,9	2,3	2,65
20	3,2	3,8	4,55

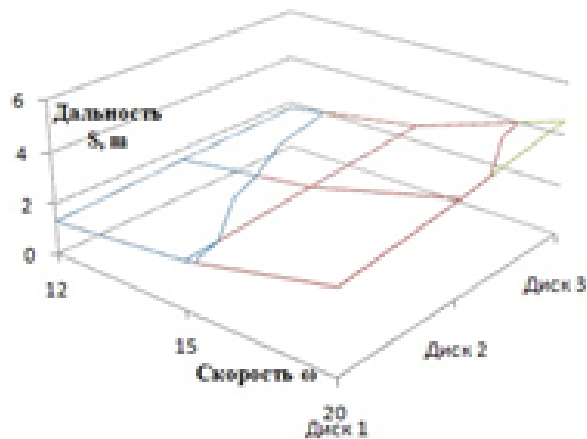


Рисунок 2.25 - Дальность выброса грунта дисками ротора-метателя R-40

Для ротора R-40 при уменьшении радиусов лопаток на 40 мм при изменении частоты вращения с 12 до 20 об/с дальность вылета с диска 1 изменялась от 1,3 до 3,2 м. Для диска 2 при изменении частоты вращения 12 до 20 об/с дальность вылета изменялась от 1,55 до 3,8 м. Для диска 3 при изменении частоты вращения 12 до 20 об/с дальность вылета изменялась от 1,75 до 4,55 м.

На рисунке 2.26 представлено распределение дальностей выброса грунта от дисков (Диск1, Диск2 и Диск3) ротора метателя R-60 при угловых скоростях вращения: $n=12,15$ и 20 рад/с, а в таблице 2.6 даны числовые данные дальности выброса грунта дисками.

Таблица 2.6 - Дальность выброса грунта дисками ротора-метателя R-60

Дальность метания, м			
Скорость, об/с	Диск 1	Диск 2	Диск 3
12	1,2	1,6	2,1
15	1,75	2,4	3,1
20	2,9	4,1	5,4

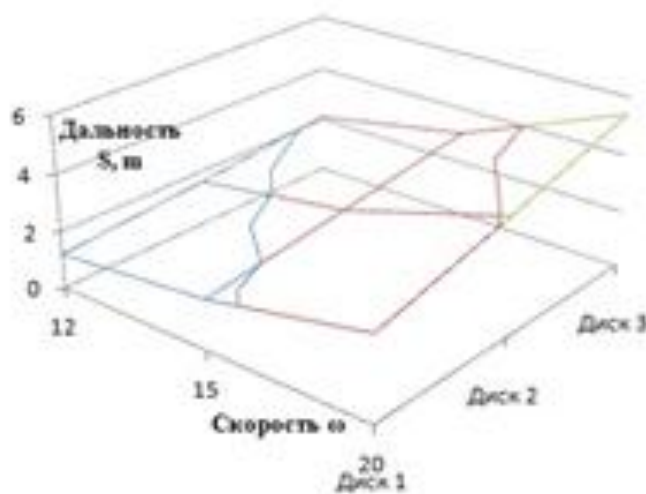


Рисунок 2.26 - Дальность выброса грунта дисками ротора-метателя R-60

Для ротора R-60 при уменьшения радиусов лопаток на 60 мм при изменении частоты вращения с 12 до 20 об/с дальность вылета с диска 1 изменялась от 1,2 до 2,9 м. Для диска 2 при изменении частоты вращения с 12 до 20 об/с дальность вылета изменялась от 1,6 до 4.1 м. Для диска 3 при изменении частоты вращения с 12 до 20 об/с, дальность вылета изменялась от 2,1 до 5,4 м.

Таким образом установлено, что дальность выброса возрастает с увеличением угловой скорости и размеров радиусов ступеней ротора-метателя.

На рисунке 2.27 представлена зависимость ширины полосы выброса грунта при работе ротора метателя для различных модификаций и при частоте вращения: $n=12, 15$ и 20 об/с.

На рисунке 2.28 представлена зависимость высоты насыпи грунта при работе ротора метателя для различных модификаций и при частоты вращения: $n=12, 15$ и 20 об/с.

Таблица 2.7 - Ширина полосы грунта, формируемая дисками ротора-метателя для модификаций R-20, R-40, R-60.

Ширина насыпи $\Delta\Omega$			
Скорость, об/с	R-20	R-40	R-60
12	0,15	0,45	0,9
15	0,25	0,75	1,35
20	0,5	1,35	2,5

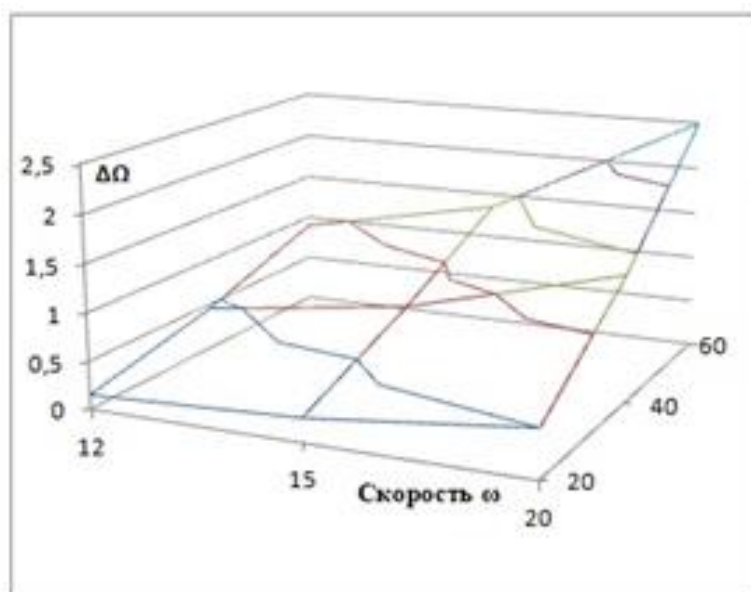


Рисунок 2.27 - Ширина полосы грунта, формируемая дисками ротора-метателя для модификаций R-20, R-40, R-60.

Для ротора-метателя R-20 при увеличении частоты вращения с 12 об/с до 20 об/с ширина полосы грунта увеличивается от 0,15 до 0,5 м. Для ротора-метателя R-40 при увеличении частоты вращения с 12 об/с до 20 об/с, ширина полосы грунта увеличивается от 0,45 до 1,35 м. Для ротора-метателя R-60 при увеличении частоты вращения с 12 об/с до 20 об/с ширина полосы грунта увеличивается от 0,9 м до 2,5 м.

Таблица 2.8 - Высота грунта в полосе, формируемая дисками ротора-метателя для модификаций R-20, R-40, R-60.

Высота насыпи ΔH			
Скорость, рад/с	R-20	R-40	R-60
12	0,40	0,13	0,07
15	0,24	0,08	0,04
20	0,12	0,04	0,02

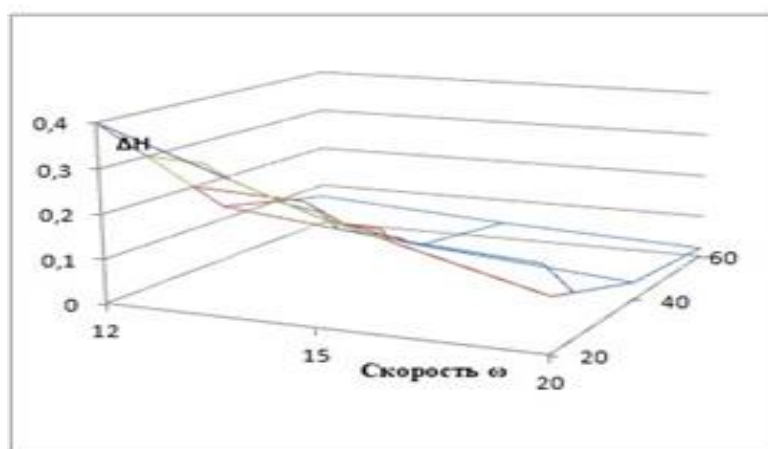


Рисунок 2.28 - Высота грунта в полосе, формируемая дисками ротора-метателя для модификаций R-20, R-40, R-60.

Для ротора-метателя R-20 при увеличении скорости вращения с 12 об/с до 20 об/с высота насыпи уменьшается от 1,2 до 0,36 м. Для ротора-метателя R-40 при увеличении скорости вращения с 12 об/с до 20 об/с, высота насыпи уменьшается от 0,4 до 0,13 м. Для ротора-метателя R-60 при увеличении угловой скорости вращения с 12 об/с до 20 об/с высота насыпи уменьшается от 0,2 м до 0,07 м.

Для выбора оптимальной конструкции ротора метателя и величины угловой скорости вращения в виду комплексности критерия эффективности (кучно-

сти и дальности) было принято решение использовать многокритериальный метод сравнения альтернатив.

Индикатор сравнения по каждой альтернативе в методе формировался

$$\omega_{js} = \sum_i \omega_i \omega_{ij}, \quad (2.34),$$

где ω_i ω_{ij} - компоненты матрицы попарного сравнения критериев и собственных векторов матриц попарного сравнения альтернатив по каждому критерию, которые рассчитывались по элементам значимости критериев и сравнения альтернатив (a_i) по соотношению:

$$\omega_i = \sqrt[k]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{i3}}, \quad (2.35)$$

Оценки элементов приведены в электронных таблицах (см. рис.1). Нормировка осуществлялась по формуле:

$$\omega_i^{jn} = \frac{\omega_i^j}{\sum_{j=1}^k \omega_i^j}, \quad (2.36)$$

где i – номер критерия, j – номер альтернативы.

Матрицы попарного сравнения критериев и собственных векторов матриц попарного сравнения альтернатив по каждому критерию составлялась с помощью шкалы относительного превосходства (таблица 2.6).

Таблица 2.9 Шкала относительной важности

Уровень превосходства	Количественное значение	Уровень отставания	Количественное значение
Превосходство отсутствует	1	Превосходство отсутствует	1
Умеренное превосходство	3	Умеренное отставание	0,33
Существенное или сильное превосходство	5	Существенное или сильное отставание	0,2
Значительное (большое)	7	Значительное (большое)	0,143
Очень большое превосходство	9	Очень большое отставание	0,111

Альтернативами рассматриваются модификации роторов метателей с различными скоростями вращения. При сравнении альтернатив были выбраны критерии, к которым относятся: высота насыпи в полосе выброса, ширина полосы выброса (кучность) и дальность выброса грунта от первого диска. Приоритетным критерием был выбран критерий высоты насыпи, поскольку вычислительный эксперимент адекватен, если ее величина лежит в интервале от 0,07 до 0,2 м. Вторым по значимости критерием была выбрана кучность или минимизация ширины полосы выброса грунта. В результате составлена таблица 2.7 сравнения критериев по значимости.

Таблица 2.10 сравнения критериев по значимости

Сравнение критериев	Высота насыпи (ΔH)	Ширина насыпи ($\Delta \Omega$)	Минимальная дальность S1
Высота насыпи (ΔH)	1,000	1,000	0,333
Ширина насыпи ($\Delta \Omega$)	1,000	1,000	0,333
Минимальная дальность S1	3,000	3,000	1,000

Необходимые оценки проведены средствами электронной таблицы Excel. В результате было выяснено, что для модификаций ротора R-20 и R-40 оптимальной скоростью вращения является 20 об/с (рис.2.29 - 2.32), а для ротора R-60 оптимальной скоростью вращения является 15 об/с.

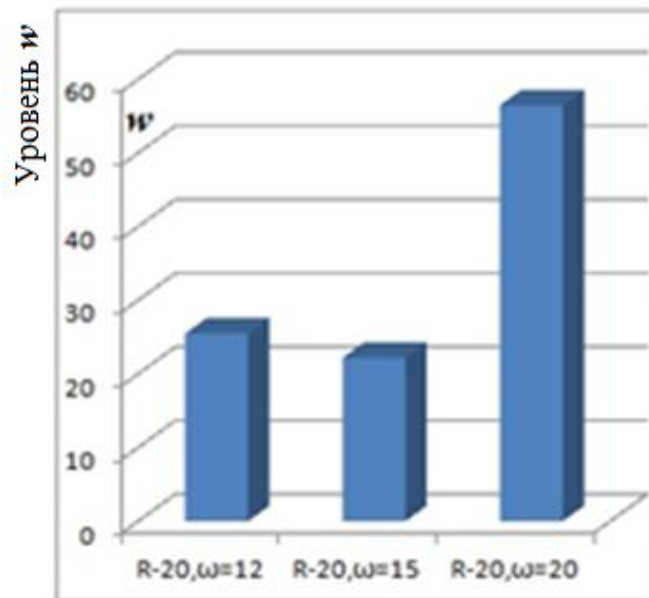


Рисунок 2.29 - Результат сравнительного анализа для R-20

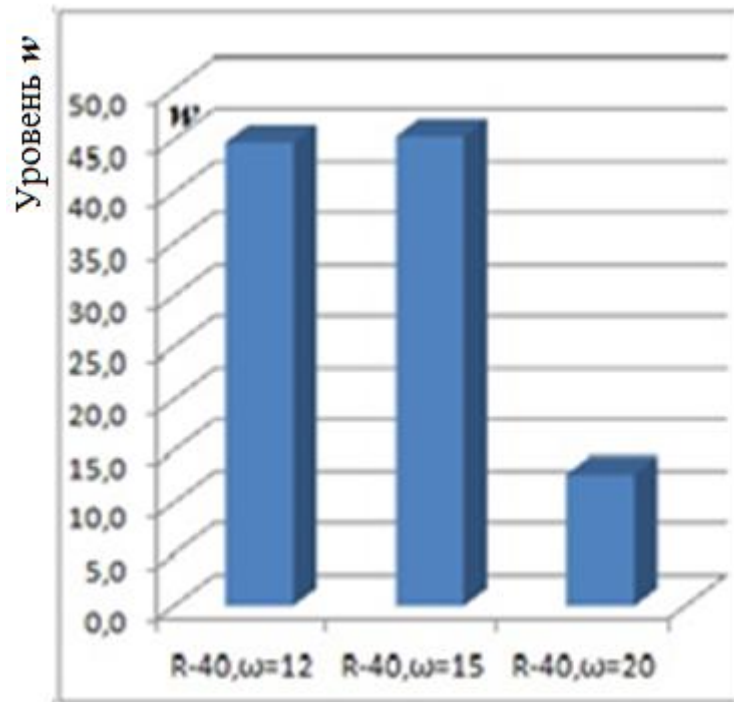


Рисунок 2.30 - Результат сравнительного анализа для R-40

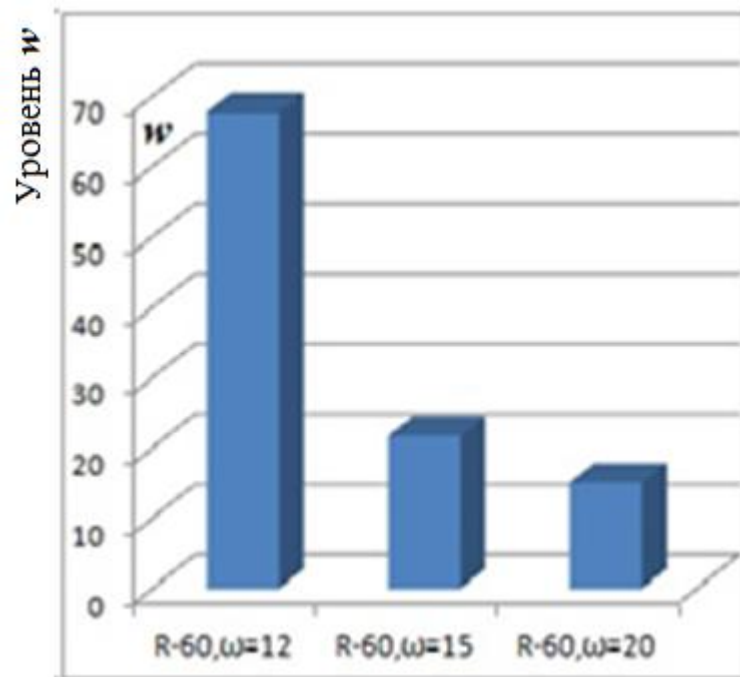


Рисунок 2.31 - Результат сравнительного анализа для R-60

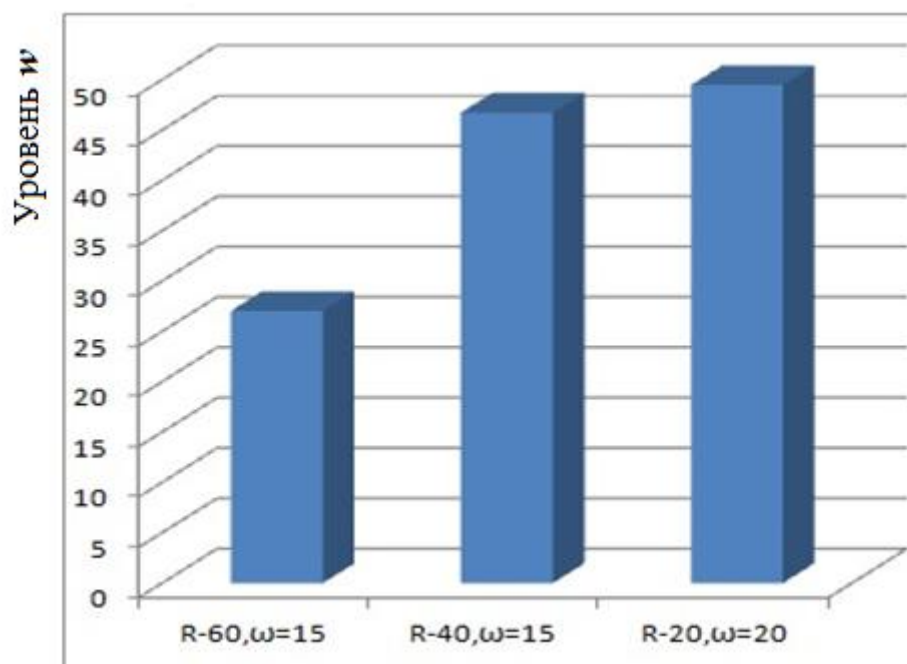


Рисунок 2.32 - Результат сравнительного анализа для трех модификаций ротора метателя.

В результате сравнительного анализа выявлено, что оптимальным выбором конструктивного решения будет модификация ротора метателя R-20 при условии его вращения со скоростью 20 об/с.

2.10. Выводы

1. Разработана грунтометательная машина с комбинированным фрезерным рабочим органом, способным доставлять необходимый объем почвогрунта за счёт разделения уровней забора из разных пластов.

2. Разработаны математическая модель рабочего процесса трехступенчатого ротора-метателя и программный комплекс, позволяющий рассчитывать траектории полета грунта на основании конструктивных и технологических параметров ротора метателя, а также распределение грунта в слое.

3. Определены основные параметры грунтометательного агрегата в результате имитационного моделирования: траектория полета грунта, толщина слоя выбрасывания, распределение грунта в слое высыпания, геометрические размеры ротора-метателя, скорость его вращения, разброс углов вылета, угол наклона лопаток, потребляемая мощность ротора-метателя.

4. Определены траектории полета грунта и дальность выброса от каждого диска ротора при радиальном положении лопаток. Для изменения дальности выброса и уменьшения разброса грунта были определены углы установки лопаток относительно радиального положения.

5. При однородном грунте вероятностный вес числа частиц при $\Delta\alpha=10^\circ$ максимален при углах метания $\alpha_i+\Delta\alpha_i$. Причём при таком сценарии большая часть грунта выбрасывается средним диском по траектории с максимальной дальностью. Неоднородность грунта в модели комбинированным углом разброса по дискам.

6. От конструктивных параметров ротора зависит объем грунта, выбрасываемый каждым из дисков. При заданных геометрических размерах ротора большая часть грунта выбрасывается третьим, самым большим диском, а меньшая – первым. Согласно вычислениям более 30% грунта выбрасывается на расстояние 10,4-11,2 м.

7. Для выбора оптимальной конструкции ротора метателя и величины угловой скорости вращения в виду комплексности критерия эффективности (кучности и дальности) использован многокритериальный метод сравнения альтернатив. В результате было выяснено, что для модификаций ротора R-20 и R-40 оптимальной скоростью вращения является 20 об/с, а для ротора R-60 оптимальной скоростью вращения является 15 об/с.

3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Программа исследований включает лабораторные и полевые исследования.

В лаборатории были проведены эксперименты для определения зависимостей давления в гидросистеме и объема выбрасываемого грунта от угла установки лопаток ротора-метателя γ .

В процессе полевых исследований предусматривалось:

- проверка работоспособности гидропривода лесопожарной грунтометательной машины в производственных условиях.

- получение зависимостей дальности полета грунта, ширины полосы выброса ($\Delta\Omega$) и высоты выбрасываемого грунта (ΔH) от радиуса ступеней ротора и скорости вращения, поскольку стояла задача кучного выброса грунта на наиболее дальнее расстояние метания.

3.2 Методика и оборудование для экспериментальных исследований

Изготовление экспериментального образца новой машины со ступенчатым ротором-метателем производилось на основе разработанной нами конструктивно-технологической схемы, новизна которой подтверждена патентом на изобретение «Лесопожарная грунтометательная машина»: № 202121717 от 24.12.2021. Проектирование и производство опытного образца лесопожарной грунтометательной машины проходило в лабораториях кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова при поддержке ООО «Сталь-Синтез».

Изготовление ступенчатого ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины проходило следующим образом:

- лопатки ротора-метателя изготавливались из листовой стали толщиной 6 мм;
- барабан ротора-метателя изготавливался также из листовой стали;
- лопатки после разметки приваривались к стальному барабану с внешним диаметром 340 мм (рисунок 3.1.).

После этого на вал ротора устанавливается набор звездочек для регулировки скорости вращения. Рама лабораторной установки изготавливалась из швеллера № 8 и уголков с шириной полок 63 мм. Резка, сверление, сварка элементов конструкции проводились в строгом соответствии с разработанной конструкторской документацией.

Скоба с лемехом и лотком-подъемником выполнена единым целым и крепится к раме 8-ю болтами М20. Привод ротора осуществляется через цепную передачу от гидромотора НПА-64 (рисунок 3.2). Корпус гидромотора соединен с рамой посредством специального сварного кронштейна.



Рисунок 3.1 - Процесс сборки ротора-метателя

Для изменения радиуса первой и второй ступени ротора изготовлены сменные накладки шириной 20 и 40 мм. Монтаж набора звездочек на вал ротора для регулировки скорости вращения показан на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Монтаж гидромотора привода ротора со сменными звездочками

Сборка и покраска нового грунтомета происходила в лабораториях кафедры механизации и проектирования машин ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - Экспериментальный образец грунтомета со ступенчатым ротором-метателем для полевых исследований

Для лабораторных исследований был изготовлен сменный одноступенчатый ротор-метатель (рис.3.4), оснащённый 6, 4 или 3 поворотными лопатками.



Рисунок 3.4 - Одноступенчатый ротор-метатель с поворотными лопатками для лабораторных исследований

Порядок проведения лабораторных исследований в почвенном канале следующий. Первоначально включается гидропривод в работу и фреза-метатель начинает вращаться с частотой 8,33 об/с, затем начинается движение тяговая тележка и лабораторный образец опускается в рабочее положение. Тяговая тележка движется с постоянной скоростью 0,25 м/с и проходит расстояние около 10 м. Фреза-метатель заглубляется в грунт на 0,15 м. Для записи давления рабочей жидкости в гидроприводе подключены датчики динамического давления ZET 315 (BC 315), от которых сигналы подаются в измерительную тензометрическую систему ZET 058. На направляющий кожух лабораторной установки крепится отводящий коллектор, который направляет весь поток метаемого

грунта в емкость, с помощью которой определяется объем выброшенного грунта. Угол установки лопаток относительно радиального положения (угол наклона лопаток) изменяется от -30° до 30° с интервалом 10° (7 уровней фактора). Интервалы изменения и уровни факторов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Граничные условия изменяемого технологического фактора

Код	Фактор	Уровень варьирования			Интервал варьирования, Δ_i
		Нижний, $X_i^{(-)}$	Основной, $X_i^{(0)}$	Верхний, $X_i^{(+)}$	
X	Угол наклона лопаток, град.	-30	0	30	10

Для полевых исследований ротора-метателя грунта лабораторная установка была снабжена навесным устройством для навешивания на заднюю навеску трактора Т-150К. Гидромотор привода ротора-метателя подготовлен к подсоединению к гидросистеме трактора.

Исследование предусматривает в себя изучение процесса метания грунта ротором-метателем со ступенчатыми лопатками. Порядок проведения полевого эксперимента следующий. Частота вращения устанавливается с помощью сменных звездочек 720 об/мин, 900 об/мин, 1200 об/мин. Включением гидропривода приводится во вращение ротор-метатель. Затем трактор Т-150К начинает движение и опытный образец опускается в рабочее положение. Трактор движется с постоянной скоростью 0,83 м/с и проходит расстояние гона около 150 м. Глубина хода почвообрабатывающей скобы устанавливается с помощью опорных катков в пределах 0,1...0,4 м.

Параметрами выбора оптимальной конструкции ротора метателя являются дальность полета грунта, ширина полосы выброса ($\Delta\Omega$) и толщина слоя выбрасываемого грунта (ΔH). Полнофакторный эксперимент (ПФЭ) должен прово-

даться для трех модификаций ротора-метателя со ступенями между лопатками каждого диска 20 мм, 40мм и 60мм (R-20, R-40, R-60) за счет сменных накладок шириной 20 и 40 мм, прикрепляемых к лопаткам первого и второго диска с помощью болтового соединения. Определение уровней и интервалов варьирования факторов для ПФЭ представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Определение уровней и интервалов варьирования факторов

Фактор			Уровни факторов			Интервал варьирования
Наименование	Обозначение		верхний	основной	нижний	
	Натуральное	Нормализованное				
Скорость вращения, об/с	$n(x_1)$	X_1	20	15	12	4
Высота лопаток, мм	$h(x_2)$	X_2	60	40	20	20

3.3. Выводы

1. Спроектирован и изготовлен экспериментальный опытный образец новой грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем на основании конструктивной и технологической схем. Их новизна подтверждена патентом на изобретение «Лесопожарная грунтометательная машина» № 2762965 с1 от 24.12.2021.

2. Разработаны методики лабораторных и полевых испытаний экспериментального образца новой грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем с применением метода полнофакторного эксперимента и современного тензометрического оборудования с использованием датчиков давления

и тензометрической станции ZetLab (измерительная тензометрическая система ZET 058).

3. Параметрами выбора оптимальной конструкции ротора метателя были выбраны дальность полета грунта, ширина полосы выброса ($\Delta\Omega$) и толщина слоя выбрасываемого грунта (ΔH).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОТОРА-МЕТАТЕЛЯ

4.1 Результаты лабораторных исследований ротора-метателя

При проведении серии экспериментов в лабораторных условиях в почвенном канале произведена запись осциллограмм давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя с помощью датчика давления ZET 315. Эти осциллограммы подверглись статистической обработке (рисунок.4.1).

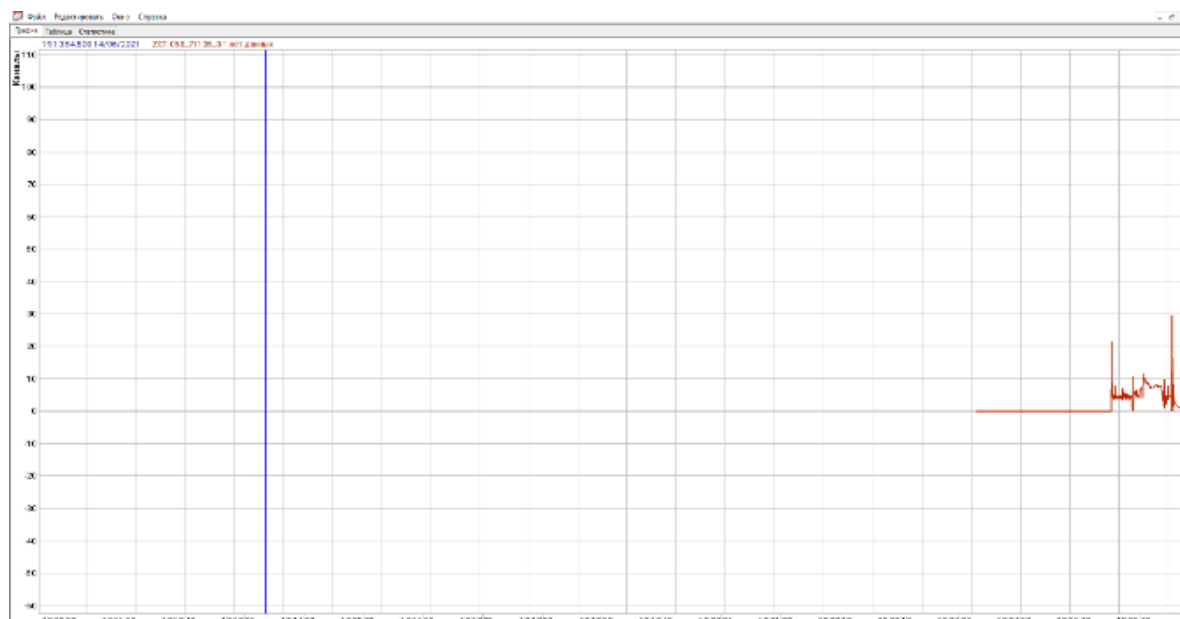


Рисунок. 4.1 - Осциллограмма давления рабочей жидкости в напорной магистрали для угла установки лопаток $\gamma=0^\circ$

Сначала была проведена серия опытов согласно матрице планирования эксперимента с установленными на фрезе-метателе 6-ю лопатками, затем с 4-мя и с 3-мя лопатками.

Результаты статистической обработки данных представлены в таблицах 4.1, 4.2, 4.3. Определена нелинейная зависимость между средним давлением рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя и углом установки лопаток.

Таблица 4.1 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию почвогрунта фрезой-метателем с шестью лопатками

Замер давления (МПа) в гидросистеме привода фрезы-метателя с шестью лопатками							
Углы установки лопаток, град.	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
Среднее	9,27	8,44	7,97	7,63	8,59	9,22	9,53
Стандартная ошибка	0,16	0,19	0,16	0,14	0,13	0,15	0,11
Медиана	9,75	8,44	7,25	7,05	8,39	9,40	9,70
Стандартное отклонение	2,80	3,28	2,83	2,35	2,27	2,63	1,99
Дисперсия выборки	7,87	10,77	8,02	5,54	5,15	6,92	3,97
Экссесс	1,92	0,54	3,18	0,53	0,73	1,06	-0,05
Асимметричность	-0,25	0,10	1,27	-0,03	-0,10	-0,42	-0,74
Интервал	19,40	19,83	20,75	14,81	13,07	14,73	9,15
Минимум	0,23	0,24	0,72	0,37	0,33	0,23	3,39
Максимум	19,63	20,07	21,48	15,18	13,41	14,96	12,54
Сумма	2606,0	2373,9	2241,1	2069,6	2285,1	2592,0	2678,2

Таблица 4.2 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию почвогрунта фрезой-метателем с четырьмя лопатками

Замер давления (МПа) в гидросистеме привода фрезы-метателя с четырьмя лопатками							
Углы установки лопаток, град.	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
Среднее	10,26	9,53	8,38	7,64	9,34	10,54	11,05
Стандартная ошибка	0,22	0,11	0,12	0,24	0,21	0,18	0,20
Медиана	11,43	9,70	8,51	6,72	9,18	10,80	11,96
Стандартное отклонение	3,80	1,99	2,08	3,88	3,67	3,02	3,37
Дисперсия выборки	14,48	3,97	4,36	15,06	13,54	9,13	11,41
Эксцесс	-0,55	-0,05	0,55	7,18	0,01	-0,18	0,47
Асимметричность	-0,68	-0,74	-0,58	2,05	-0,28	-0,62	-1,08
Интервал	18,17	9,15	11,85	27,78	21,71	14,95	15,09
Минимум	0,24	3,39	0,26	0,18	0,25	0,53	0,22
Максимум	18,42	12,54	12,11	27,96	21,96	15,48	15,31
Сумма	2883,5	2678,2	2356,8	1896,1	2626,6	2962,6	2963,1

Таблица 4.3 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию почвогрунта фрезой-метателем с тремя лопатками

Замер давления (МПа) в гидросистеме привода фрезы-метателя с тремя лопатками							
Углы установки лопаток, град.	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
Среднее	9,22	7,97	7,63	6,45	7,63	9,53	10,23
Стандартная ошибка	0,15	0,16	0,14	0,43	0,14	0,11	0,19
Медиана	9,40	7,25	7,03	3,48	7,03	9,70	11,32
Стандартное отклонение	2,63	2,83	2,48	7,21	2,48	1,99	3,18
Дисперсия выборки	6,92	8,02	6,17	52,06	6,15	3,97	10,16
Экссесс	1,06	3,18	0,96	2,51	0,93	-0,05	0,36
Асимметричность	-0,42	1,27	0,16	1,86	0,17	-0,74	-1,11
Интервал	14,73	20,75	16,87	28,48	16,67	9,15	14,59
Минимум	0,23	0,72	0,17	0,16	0,37	3,39	0,34
Максимум	14,96	21,48	17,04	28,64	17,04	12,54	14,93
Сумма	2592,0	2241,1	2145,3	1815,1	2145,6	2678,2	2876,4

При обработке экспериментальных данных построены графики зависимости давления в гидроприводе от угла установки лопаток фрезы-метателя в виде полинома второй степени (рисунки 4.2-4.4).

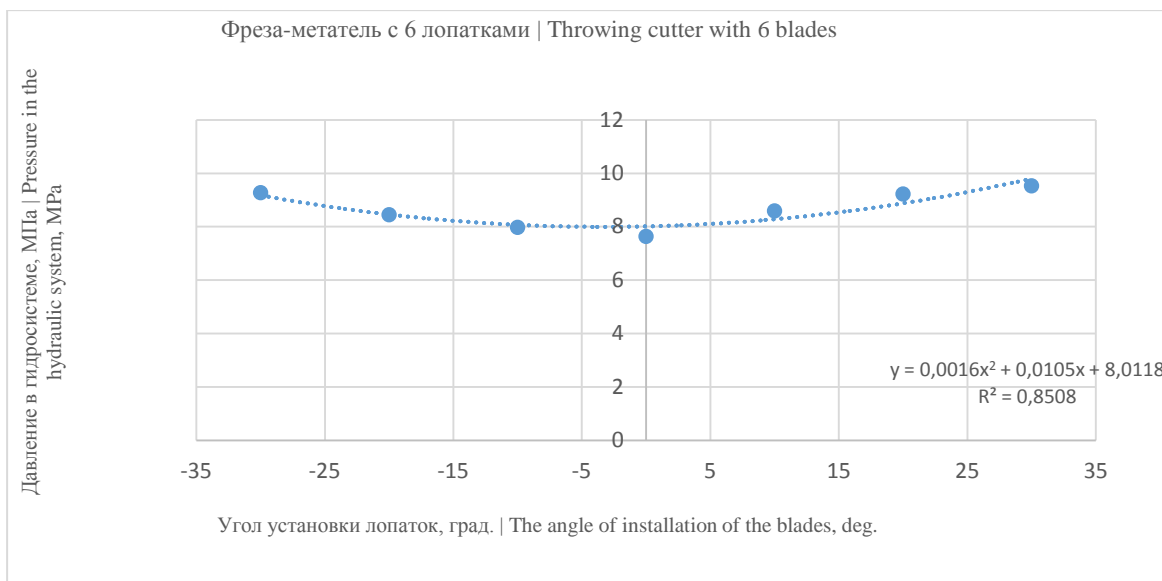


Рисунок 4.2 - Зависимость давления в гидроприводе от угла установки лопаток ротора-метателя с шестью лопатками

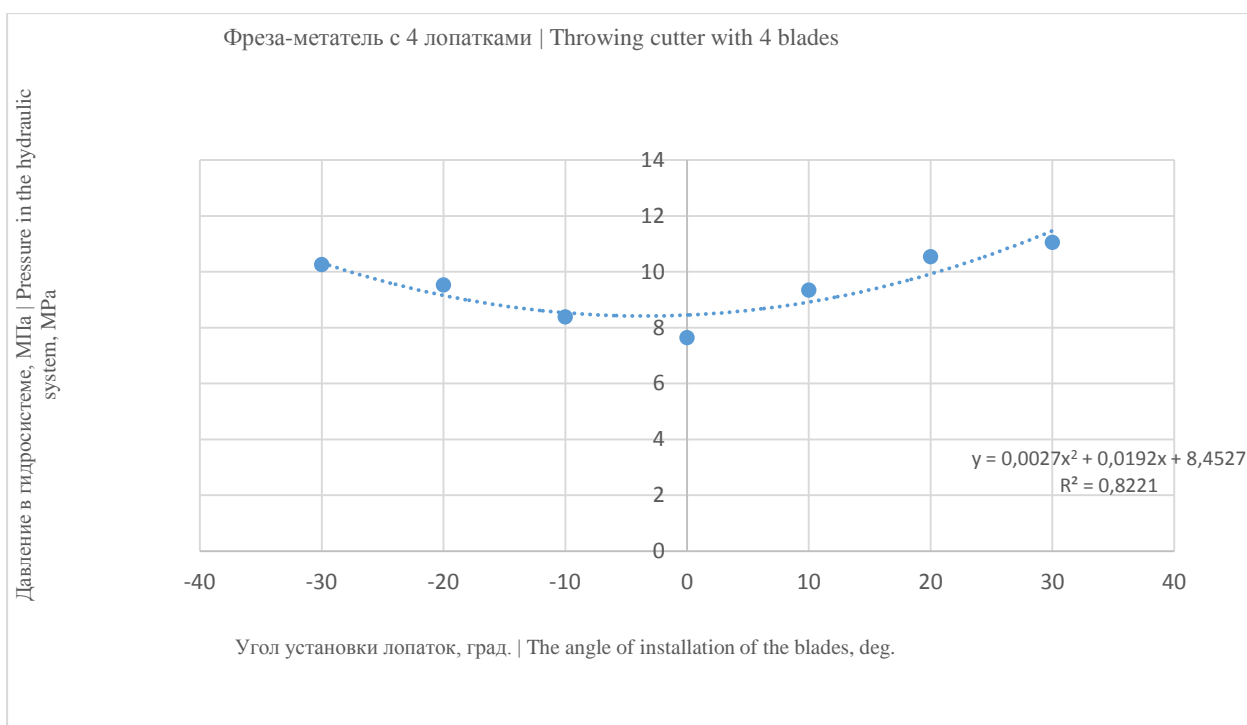


Рисунок 4.3 - Зависимость давления в гидроприводе от угла установки лопаток ротора-метателя с четырьмя лопатками

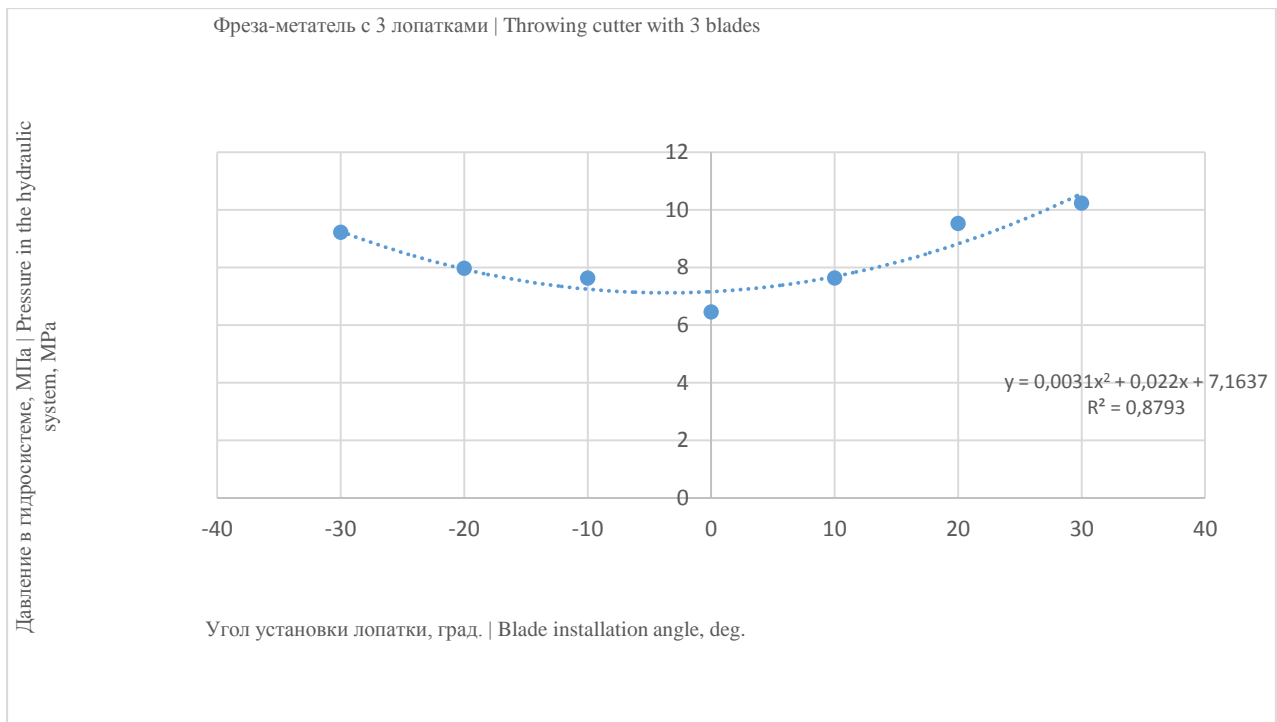


Рисунок 4.4 - Зависимость давления в гидроприводе от угла установки лопаток ротора-метателя с тремя лопатками

Максимальные значения давления наблюдаются при максимальных углах установки лопаток (-30° и 30°) не зависимо от количества установленных лопаток. Минимальное давление рабочей жидкости на уровне 6...8 МПа наблюдается при установке лопаток в радиальном положении (угол наклона 0°). Для наглядности совмещаем 3 графика на одной координатной плоскости и оцениваем давление рабочей жидкости P в гидроприводе при разном количестве установленных лопаток и различных углах их установки γ (рис. 4.5).

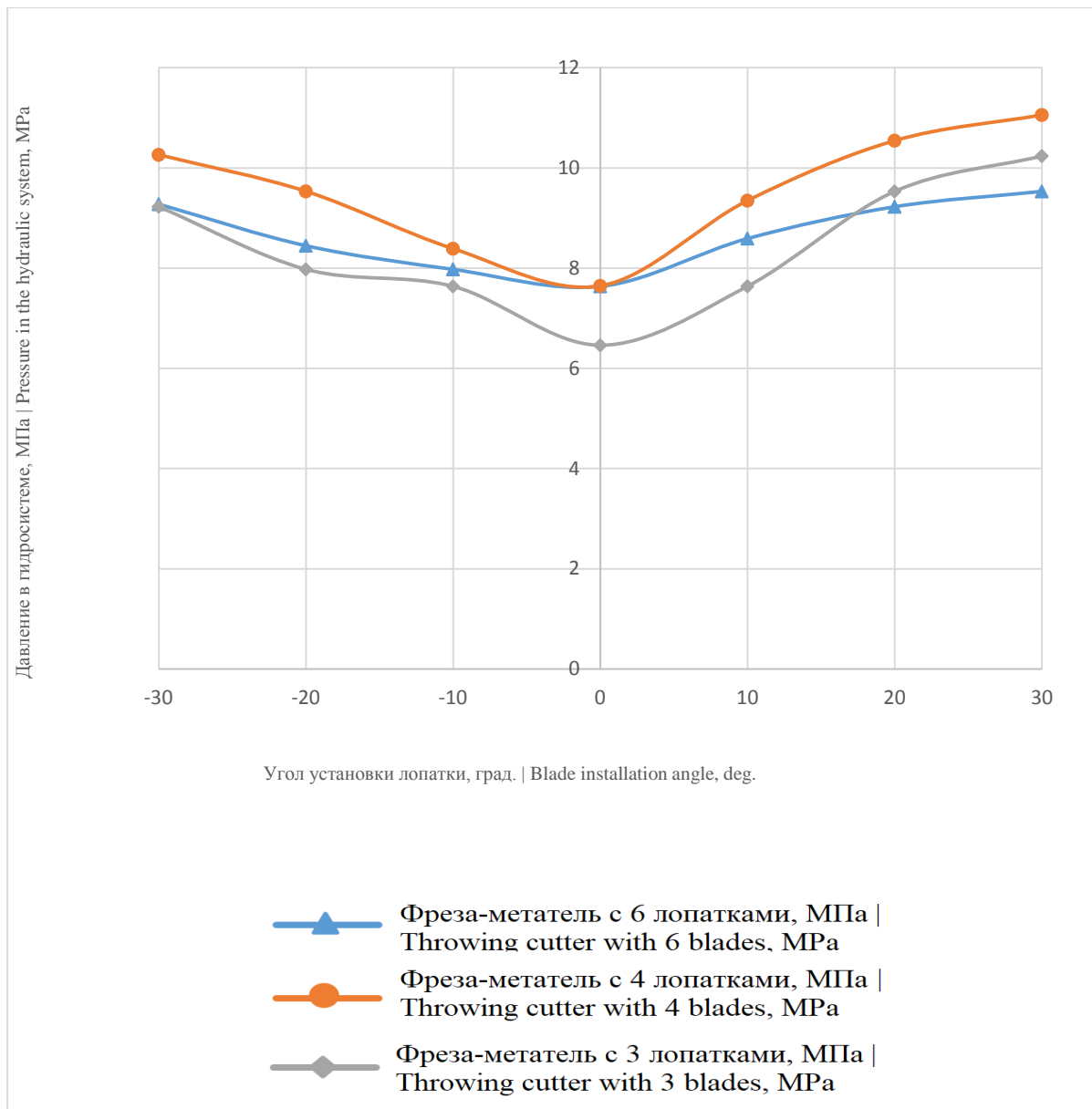


Рисунок 4.5 - Изменение величины давления в гидроприводе ротора-метателя с 6, 4 и 3 лопатками в зависимости от угла установки лопаток

Кроме давления рабочей жидкости в гидроприводе в ходе опытов измерялся удельный объем выброшенного грунта, что является немаловажным показателем работы метателя. Результаты замеров представлены в таблице 4.4 и на рисунке 4.6.

Таблица 4.4 - Результаты экспериментальных замеров объема метаемого почвогрунта

Номер опыта	Значение X	Объем грунта на квадратный метр, метаемого 6 лопатками, м ³	Объем грунта на квадратный метр, метаемого 4 лопатками, м ³	Объем грунта на квадратный метр, метаемого 3 лопатками, м ³
1	-30	0,1	0,1	0,085
2	-20	0,1	0,095	0,08
3	-10	0,1	0,09	0,08
4	0	0,05	0,05	0,05
5	10	0,09	0,07	0,07
6	20	0,07	0,05	0,07
7	30	0,1	0,1	0,09

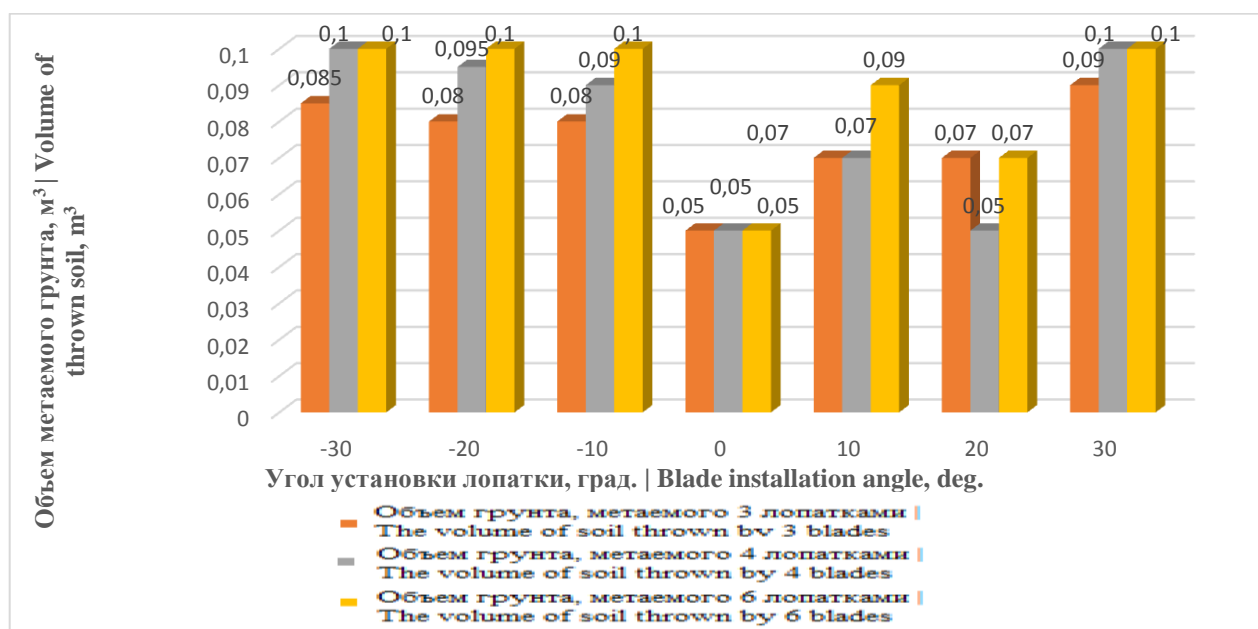


Рисунок 4.6 - Гистограмма зависимости объема метаемого грунта ротором-метателем с 6, 4 и 3 лопатками от угла их установки

Независимо от числа установленных лопаток минимальное давление в гидросистеме привода наблюдается при угле установки лопаток $\gamma = -10^\circ$, который принимаем как оптимальный. Скачки давления в гидроприводе минимальны при установленных 6 лопатках, привод работает более плавно. Это объясняется постоянным контактом лопаток с грунтом. Выбрасываемый ротором объем грунта больше, чем необходимый для локализации огня. При необходимом $0,06 \text{ м}^3$ ротор с 3 лопатками выбрасывает $0,08 \text{ м}^3$, с 4 лопатками $0,09 \text{ м}^3$ и $0,1 \text{ м}^3$ с 6 лопатками. По результатам опытов выявлено, что оптимальным углом установки лопаток по критерию минимального давления в гидроприводе будет $\gamma = -10^\circ$ и рационально установить 6 лопаток, поскольку при этом минимизированы скачки давления в гидроприводе, более плавная работа гидропривода и максимальный объем выбрасываемого грунта. Однако, по критерию минимальных энергозатрат оптимальным углом установки лопаток будет $\gamma = 0^\circ$.

4.2. Результаты полевых исследований рабочих процессов по обоснованию параметров ротора-метателя грунтомета

Для полевых исследований ротора-метателя грунта лабораторная установка была смонтирована на заднюю навеску трактора Т-150К (рисунок 4.7). Гидромотор привода ротора-метателя был подсоединен к гидросистеме трактора.



Рисунок 4.7 - Экспериментальный образец лесопожарного грунтомета в агрегате с трактором Т-150К

Подключение тензометрических датчиков в гидропривод ротораметателя показано на рисунке 4.8. Запись давления в гидроприводе ротораметателя проводилась с помощью тензоизмерительного комплекса ZET 058 с программным обеспечением ZETLAB TENZO (рисунок 4.9).



Рисунок 4.8 - Установка тензометрических датчиков в гидропривод ротора-метателя.

Образцы осциллограмм давления рабочей жидкости получены согласно плана эксперимента для девяти опытов с разными вариантами настроек ротора-метателя (рисунки 4.10-4.12) с частотой вращения 12 об/с. По показаниям датчика ZET 315 были записаны средние, минимальные, максимальные значения давления. В результате обработки этих данных были получены графики зависимости давления от геометрических параметров ротора-метателя и частоты вращения (рисунки 4.13 – 4.15).

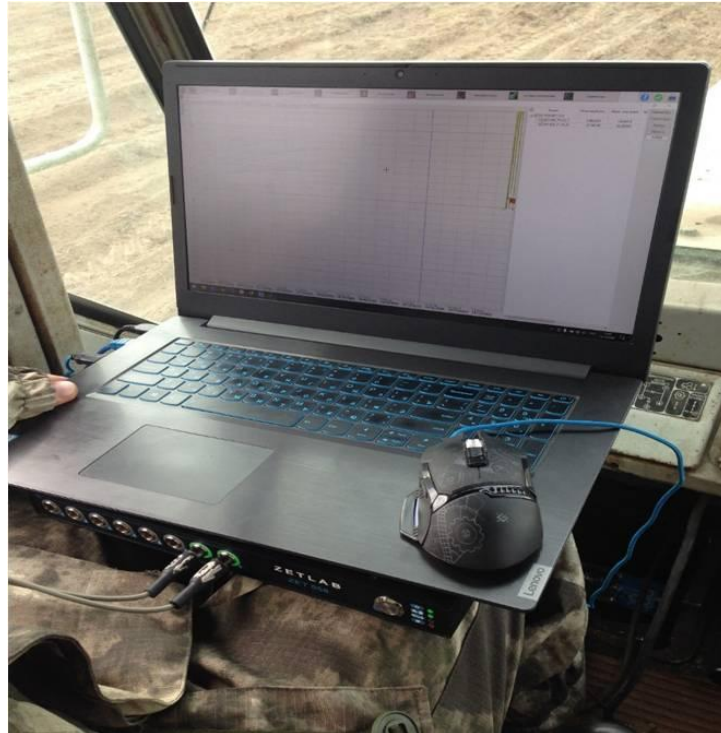


Рисунок 4.9 - Установка тензометрической станции ZetLab в кабине трактора Т-150К

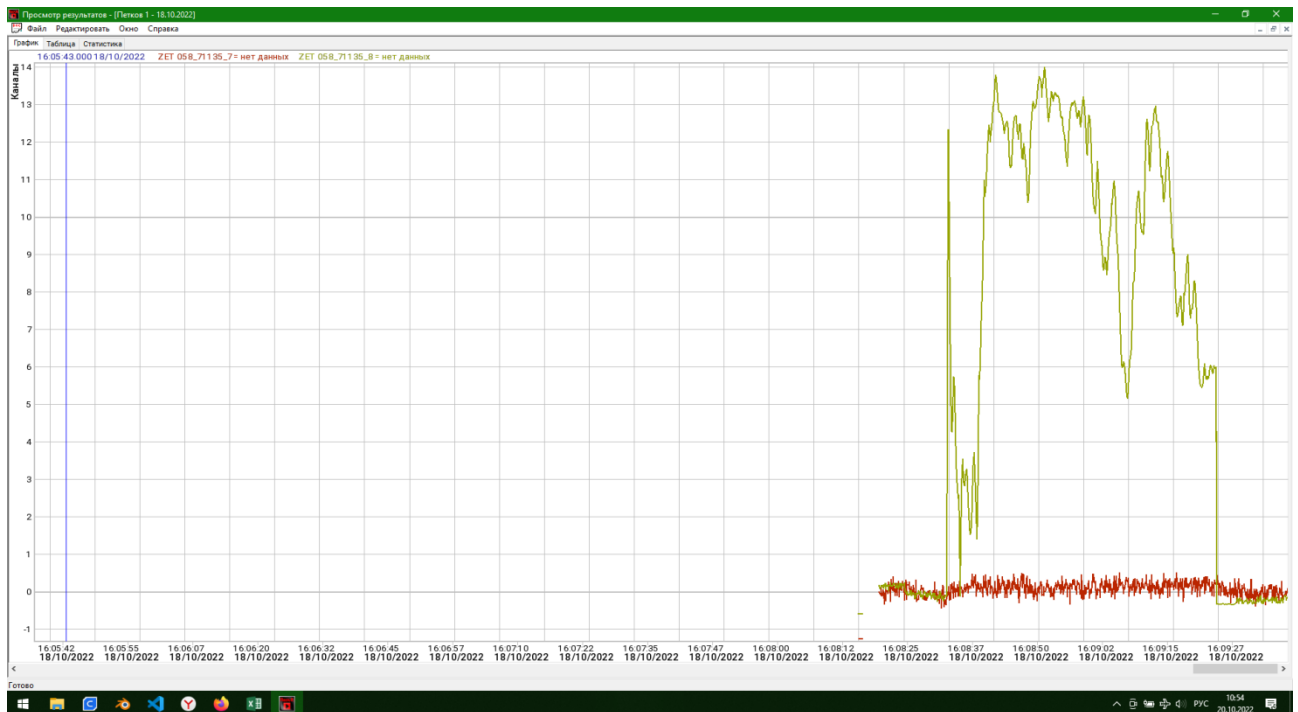


Рисунок 4.10 - Осциллограмма давления рабочей жидкости в гидроприводе ротора-метателя R-60 при частоте вращения 12 об/с.

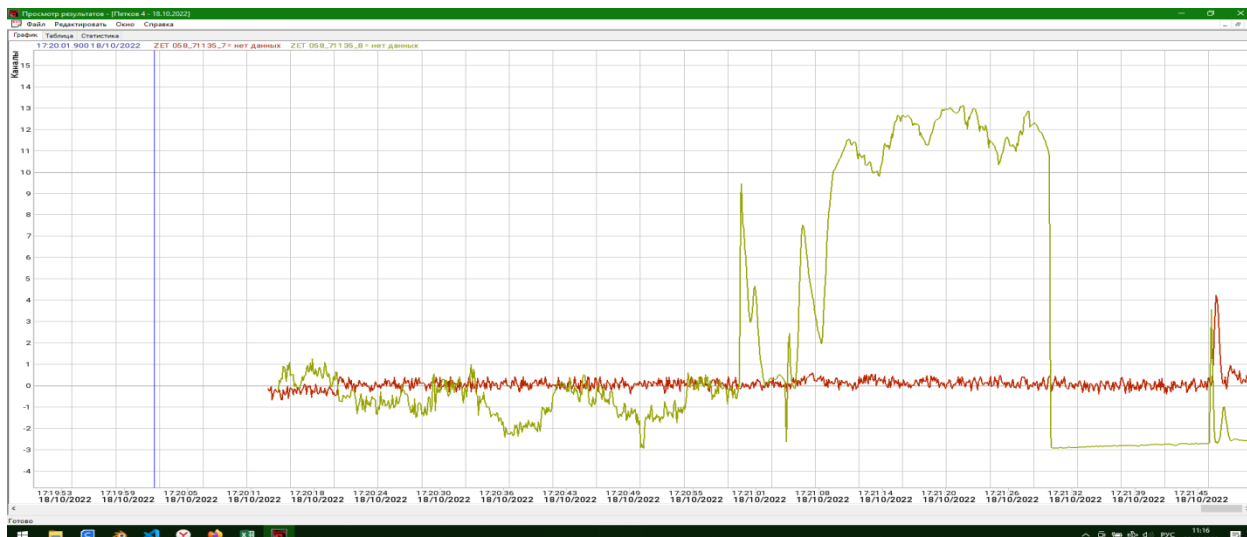


Рисунок 4.11 - Осциллограмма давления рабочей жидкости в гидроприводе ротора-метателя R-40 при частоте вращения 12 об/с.

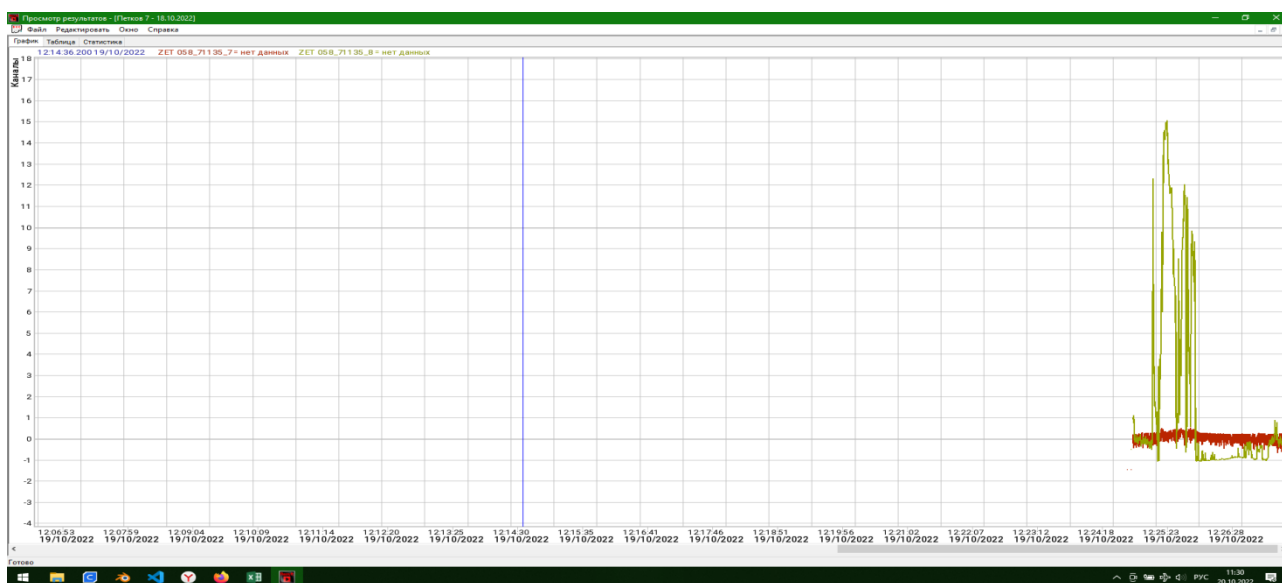


Рисунок 4.12 - Осциллограмма давления рабочей жидкости в гидроприводе ротора-метателя R-20 при частоте вращения 12 об/с.

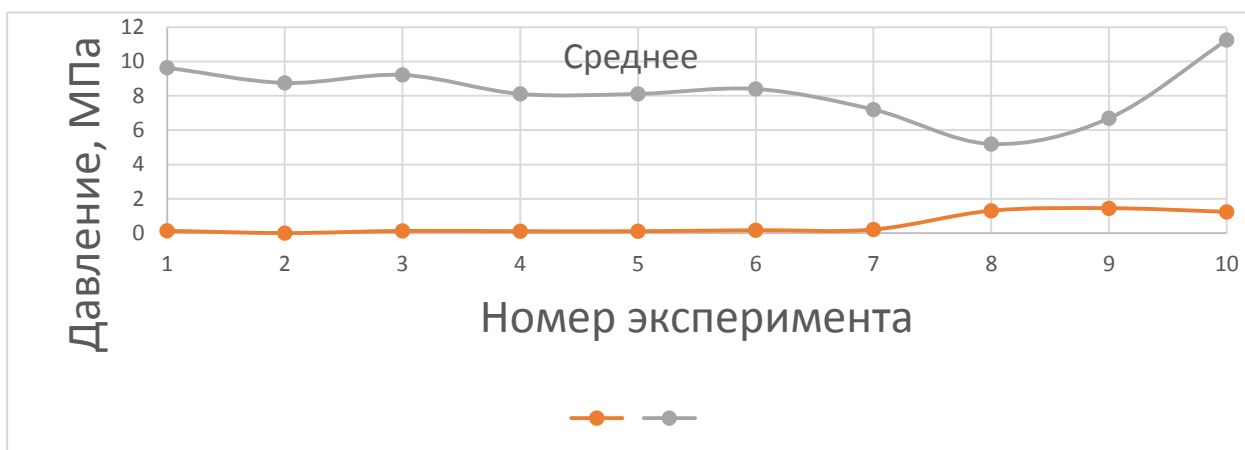


Рисунок 4.13 – Средние значения давления рабочей жидкости в гидроприводе ротора-метателя R-20 при частоте вращения 12 об/с.

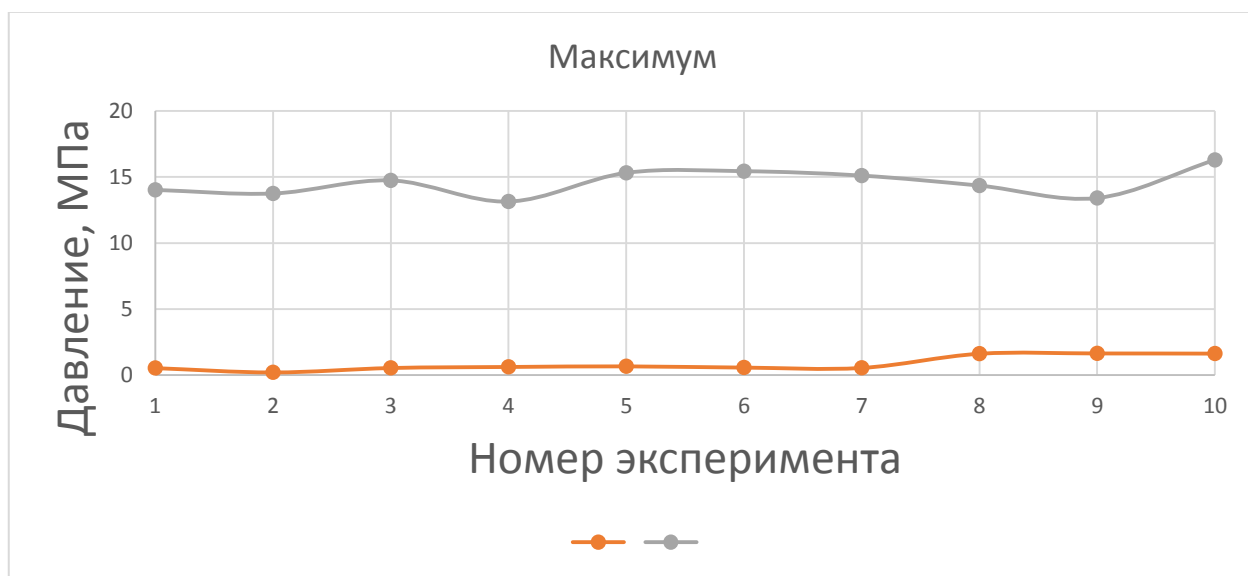


Рисунок 4.14 – Максимальные значения давления рабочей жидкости в гидроприводе ротора-метателя R-20 при частоте вращения 12 об/с.

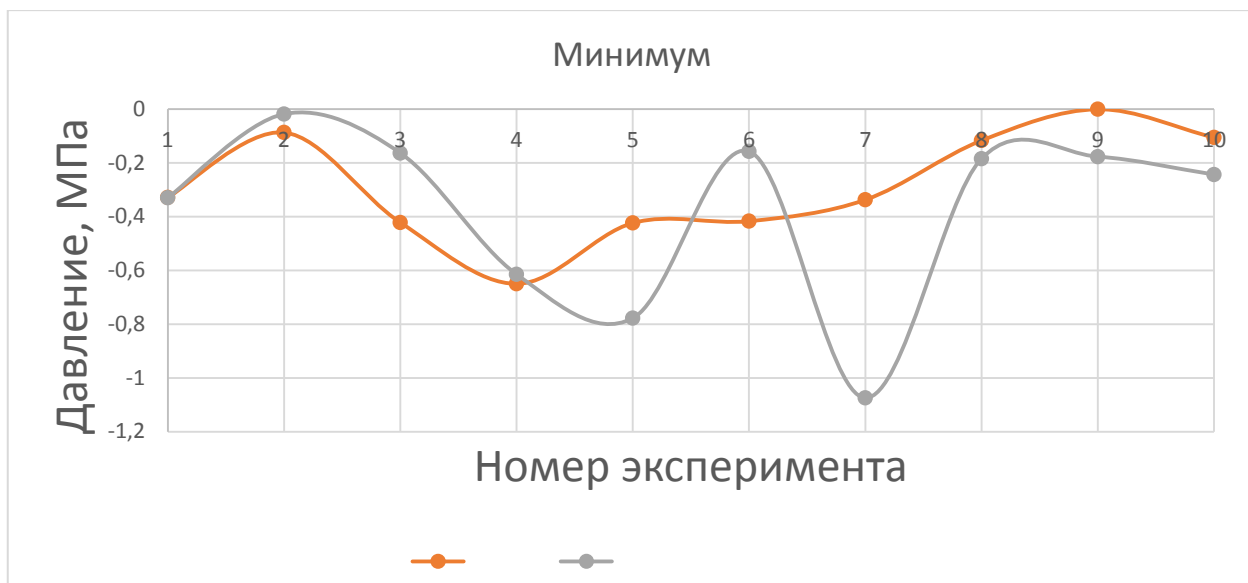


Рисунок 4.15 – Минимальные значения давления рабочей жидкости в гидроприводе ротора-метателя R-20 при частоте вращения 12 об/с.

Были выполнены эксперименты по дальности метания грунта и толщине слоя насыпи грунта метания почвогрунта согласно матрице планирования эксперимента для трех модификаций ротора-метателя (R-20, R-40, R-60) при различной частоте вращения ротора-метателя (рисунки 4.16-4.17).

Результаты полнофакторного эксперимента по качественным показателям приведены в таблице 4.5.



Рисунок 4.16 - Замеры дальности полета потока грунта

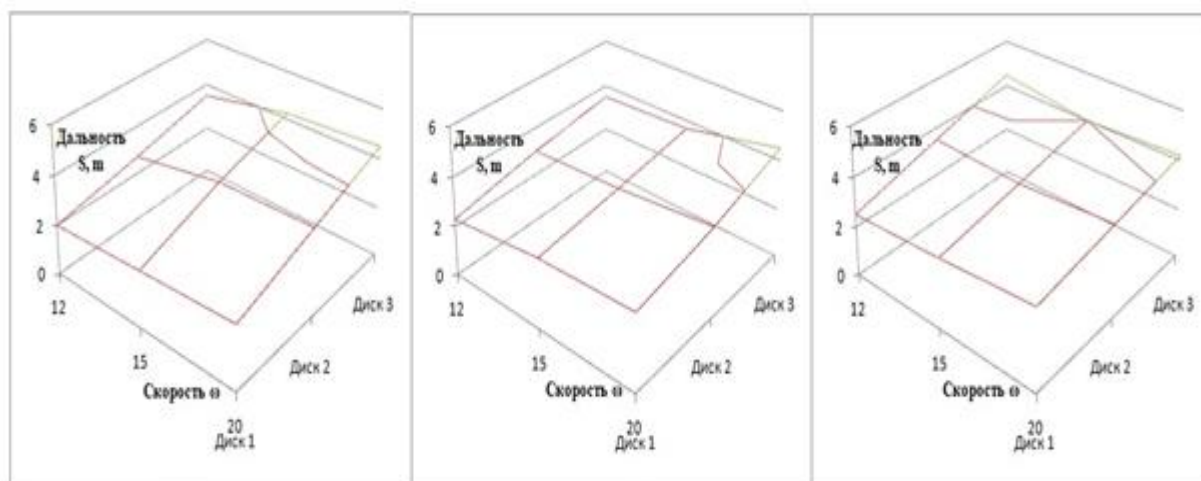


Рисунок 4.17 - Замеры толщины слоя метания грунта

Таблица 4.5 - План эксперимента, значения качественных параметров

№	Частота вращения, об/с	Высота надставок лопаток, мм	Дальность метания грунта, м			Ширина полосы, м	Толщина слоя насыпи, м	Давление, МПа
	X ₁	X ₂	Y ₁			Y ₂	Y ₃	Y ₄
1	-1 (12)	1 (60)	2,00	2,70	3,50	1,50	0,04	14,73
2	0 (15)	1 (60)	2,25	3,40	4,25	2,00	0,03	13,74
3	1 (20)	1 (60)	2,50	3,50	4,50	2,00	0,03	13,13
4	-1 (12)	0 (40)	2,30	3,00	3,50	1,20	0,05	15,43
5	0 (15)	0 (40)	2,80	3,20	3,65	0,85	0,07	15,09
6	1 (20)	0 (40)	3,00	3,60	4,50	1,50	0,04	15,30
7	-1 (12)	-1 (20)	2,50	3,50	4,50	2,00	0,03	13,40
8	0 (15)	-1 (20)	2,80	3,40	4,00	1,20	0,05	14,34
9	1 (20)	-1 (20)	3,20	3,70	4,20	1,00	0,06	16,28

На рисунке 4.18 представлено распределение дальностей выброса грунта от дисков ротора метателя при угловых скоростях вращения: $\omega=12,15$ и 20 об/с для всех модификаций ротора. В результате дальность выброса возрастает с увеличением угловой скорости и размерами между лопатками согласно вычислительному эксперименту. В полевых условиях очевидным остается возрастание при увеличении скорости вращения.



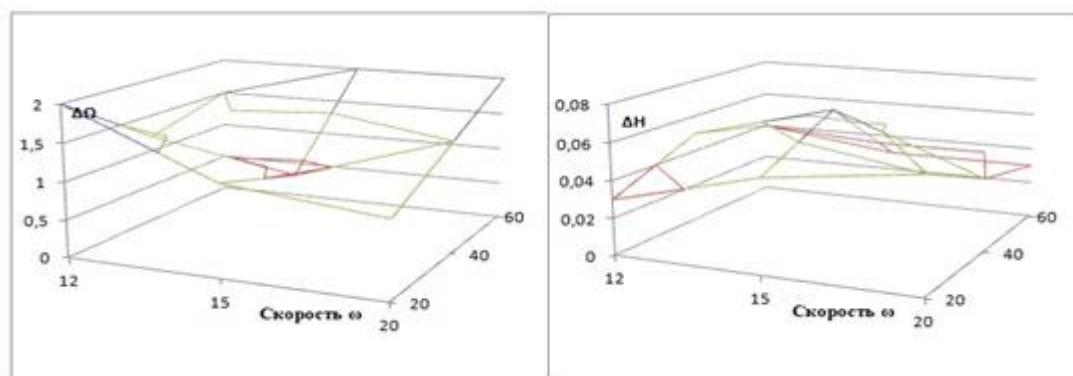
a) R-60

b) R-40

c) R-20

Рисунок 4.18 - Дальность выброса грунта дисками ротора метателя в результате полевых испытаний

На рисунке 4.19 представлены результаты полевых испытаний по выявлению зависимости ширины полосы выброса грунта при работе ротора метателя для различных модификаций и при угловых скоростях вращения: $\omega=12, 15$ и 20 об/с.



a) ширина полосы грунта,

b) высота грунта в полосе,

Рисунок 4.19 - Результаты полевых испытаний по выявлению зависимостей от скорости вращения ротора метателя для модификаций R-20, R-40, R-60.

Зависимость носит сложный и неоднозначный характер. Для детализации полученных результатов была проведен стохастический анализ распределения вероятности величин ширины насыпи и высоты грунта. Интервалы для распределения выбирались в соответствии с целью исследования.

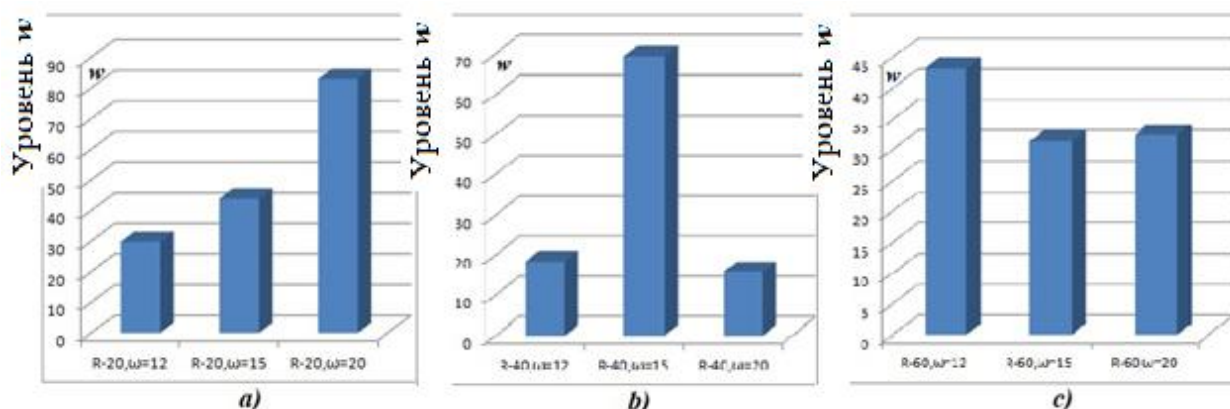


Рисунок 4.20 - Результат сравнения альтернатив по результатам полевых испытаний.

Необходимые оценки были проведены средствами электронной таблицы Excel по результатам полевых испытаний (см рис.4.20).

В результате было выяснено, что для модификации ротора с R=20см оптимальной скоростью вращения по данным вычислительного эксперимента и полевых испытаний является $\omega=20$ об/с (см. рис.2.29 и рис. 4.20. a). Для модификации ротора с R=40см оптимальной скоростью вращения по данным вычислительного эксперимента и полевых испытаний является $\omega=15$ об/с (см. рис.2.30 и рис. 4.20. b). Для модификации ротора с R=60 см оптимальной скоростью вращения по данным вычислительного эксперимента и полевых испытаний является $\omega=15$ об/с (см. рис.2.31 и рис. 4.20. c). Эти выводы свидетельствуют о хорошем согласовании теоретических и экспериментальных

исследованиях, несмотря на разброс данных и явное расхождение абсолютных величин исследуемых критериев сравнения.

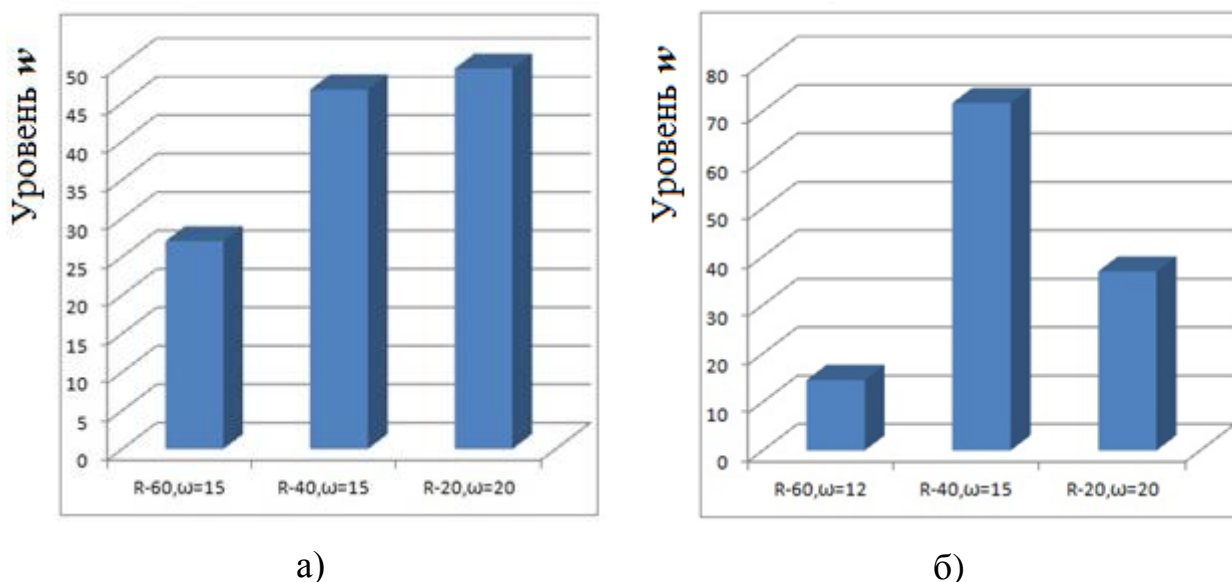


Рисунок 4.21 - Результат сравнения альтернатив по данным вычислительного эксперимента (а) и по данным полевых испытаний (б)

В результате анализа данных вычислительного эксперимента методом многокритериального сравнения альтернатив выявлено, что оптимальным выбором конструктивного решения ротора метателя будут модификации ротора метателя с $R=40\text{мм}$ при условии его вращения со скоростью 15 об/с или с $R=20\text{мм}$ при условии его вращения со скоростью 20 об/с. Однако, анализ данных полевых испытаний этим же методом однозначно определяет оптимальный вариант как модификация ротора метателя с $R=40\text{мм}$ при условии его вращения со скоростью 15 об/с.

4.3. Выводы

1. При проведении серии экспериментов в лабораторных условиях в почвенном канале произведена запись осциллограмм давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя с помощью датчика давления ZET 315. Эти осциллограммы подверглись статистической обработке. Получены зависимости давления в гидроприводе от угла установки лопаток ротора-метателя для: 6 лопаток; 4 лопаток; 3 лопаток.

2. При обработке экспериментальных данных построены графики зависимости давления в гидроприводе от угла установки лопаток фрезы-метателя в виде полинома второй степени. Максимальные значения давления наблюдаются при максимальных углах установки лопаток (-30° и 30°) не зависимо от количества установленных лопаток. Минимальное давление рабочей жидкости на уровне 6...8 МПа наблюдается при установке лопаток в радиальном положении (угол наклона 0°).

3. Независимо от числа установленных лопаток минимальное давление в гидросистеме привода наблюдается при угле установки лопаток $\gamma = -10^\circ$, который принимаем как оптимальный. Скачки давления в гидроприводе минимальны при установленных 6 лопатках, привод работает более плавно. Это объясняется постоянным контактом лопаток с грунтом. Выбрасываемый ротором объем грунта больше, чем необходимый для локализации огня. При необходимом $0,06 \text{ м}^3$ ротор с 3 лопатками выбрасывает $0,08 \text{ м}^3$, с 4 лопатками $0,09 \text{ м}^3$ и $0,1 \text{ м}^3$ с 6 лопатками. По результатам опытов выявлено, что оптимальным углом установки лопаток по критерию минимального давления в гидроприводе будет $\gamma = -10^\circ$ и рационально установить 6 лопаток, поскольку при этом минимизированы скачки давления в гидроприводе, более плавная работа гидропривода и максимальный объем выбрасываемого грунта. Однако, по критерию минимальных энергозатрат оптимальным углом установки лопаток будет $\gamma = 0^\circ$.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ С ТРЕХСТУПЕНЧАТЫМ РОТОРОМ-МЕТАТЕЛЕМ

5.1 Результаты производственных испытаний опытного образца лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем

При проведении испытания опытного образца лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем в агрегате с трактором Т-150К на испытательном полигоне кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ получены зависимости показателей эффективности полосопрокладывателя, таких как производительность $P(\alpha)$ и дальность выброса грунта $L_{cp}(\alpha)$ от параметров трехступенчатого ротора-метателя (рисунок 5.1).

За счет применения гидропривода ротора-метателя уменьшилось время простоев из-за повышения надежности машины, т.к. рабочие органы предохраняются от поломок за счет срабатывания предохранительных клапанов гидромотора. Кроме того, выполненные единым целым скоба с лемехом и лотком-подъемником защищают ротор от прямого контакта с препятствиями в виде пней и корней, что также значительно повышает надежность нового агрегата по сравнению с базовыми моделями, у которых фрезерные головки при работе заглубляются в почву и не защищены от ударов о пни и корни.



Рисунок 5.1 – Полевые испытания опытного образца лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем

Анализ экспериментальных данных, полученных при проведении опытов по методу полнофакторного эксперимента подтвердили результаты теоретических исследований.

5.2 Расчет экономической эффективности применения новой лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем

Расчет экономической эффективности от применения новой лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем производился в соответствии с «Отраслевыми методическими указаниями по определению экономической эффективности использования в лесном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений», учитывая действующее законодательство.

За базовую модель, с которым производилось сравнение экономических показателей, был принят серийный фрезерный полосопрокладыватель ПФ-1 с рабочими органами для поперечного фрезерования и метания грунта. Применяется на различных почвах для прокладки и подновления противопожарных полос. Потребляемая мощность 30-40 кВт, масса машины составляет 510 кг, общая ширина защитной полосы до 10 м. Агрегируется с тракторами тягового класса 30 кН, с приводом от вала отбора мощности, при этом производительность составляет около 2,34 км/ч.

Экономический эффект внедрения достигается за счёт повышения эффективности процесса прокладки противопожарных полос, путём применения нового ротора-метателя, обеспечивающего доставку необходимого объема почвогрунта по всей ширине полосы.

Как показывает экономический расчет, применение новой лесопожарной грунтометательной машины для прокладки противопожарных полос позволяет повысить производительность орудия. Экономический эффект от применения новой лесопожарной грунтометательной машины составил 826067руб. при сроке окупаемости 0,15 года. Расширенный экономический расчет представлен в Приложении А.

Полученные результаты работы внедрены в Воронежском лесопожарном центре, ООО «Сталь-Синтез» и в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова » при подготовке бакалавров и магистров (ПРИЛОЖЕНИЕ Б).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В ходе исследования рассмотрены причины возникновения и меры, применяемые для борьбы и предотвращения лесного пожара. Рассмотрены конструкции существующих агрегатов и фрез-метателей, в частности, а также проведён анализ научных трудов в области исследования. Для защиты от лесных пожаров высокоэффективными являются агрегаты с активными рабочими органами, но существующие фрезерные рабочие органы не позволяют доставлять необходимое количество почвогрунта к кромке лесного низового пожара. Разработана новая грунтометательная машина с трехступенчатым ротором-метателем, способным доставлять необходимый объем почвогрунта за счёт разделения уровней забора из разных пластов.

2. Разработаны математическая модель рабочего процесса трехступенчатого ротора-метателя и программный комплекс, позволяющий рассчитывать траектории полета грунта на основании конструктивных и технологических параметров ротора метателя, а также распределение грунта в слое.

3. Определены траектории полета грунта и дальность выброса от каждого диска ротора при радиальном положении лопаток. Для изменения дальности выброса и уменьшения разброса грунта были определены углы установки лопаток относительно радиального положения. При однородном грунте вероятностный вес числа частиц при $\Delta\alpha=10^\circ$ максимален при углах метания $\alpha_i+\Delta\alpha_i$. Причём при таком сценарии большая часть грунта выбрасывается средним диском по траектории с максимальной дальностью. Неоднородность грунта в модели комбинированным углом разброса по дискам. От конструктивных параметров ротора зависит объем грунта, выбрасываемый каждым из дисков. При заданных геометрических размерах ротора большая часть грунта выбрасывается третьим, самым большим диском, а меньшая – первым. Согласно вычислениям более 30% грунта выбрасывается на расстояние 10,4-11,2 м.

4. Разработан и изготовлен экспериментальный образец новой грунто-метательной машины с трехступенчатым ротором-метателем на основе конструктивно-технологической схемы новизна, которой подтверждена патентом на изобретение «Лесопожарная грунтометательная машина» : № 2762965С1 от 24.12.2021. Проведены лабораторные и полевые исследования с применением метода полнофакторного эксперимента и современного тензометрического оборудования с использованием датчиков давления и измерительной тензометрической системы ZetLab ZET 058.

5. Независимо от числа установленных лопаток минимальное давление в гидросистеме привода наблюдается при угле установки лопаток $\gamma = -10^\circ$, который принимаем как оптимальный. Скачки давления в гидроприводе минимальны при установленных 6 лопатках, привод работает более плавно. Это объясняется постоянным контактом лопаток с грунтом. Выбрасываемый ротором объем грунта больше, чем необходимый для локализации огня. При необходимом $0,06 \text{ м}^3$ ротор с 3 лопатками выбрасывает $0,08 \text{ м}^3$, с 4 лопатками $0,09 \text{ м}^3$ и $0,1 \text{ м}^3$ с 6 лопатками. По результатам опытов выявлено, что оптимальным углом установки лопаток по критерию минимального давления в гидроприводе будет $\gamma = -10^\circ$ и рационально установить 6 лопаток, поскольку при этом минимизированы скачки давления в гидроприводе, более плавная работа гидропривода и максимальный объем выбрасываемого грунта. Однако, по критерию минимальных энергозатрат оптимальным углом установки лопаток будет $\gamma = 0^\circ$.

6. На основе многокритериального метода сравнения альтернатив были выбраны критерии, к которым относятся: высота насыпи в полосе выброса, ширина полосы выброса (кучность) и дальность выброса грунта от первого диска. Приоритетным критерием был выбран критерий высоты насыпи, поскольку вычислительный эксперимент адекватен, если ее величина лежит в интервале от 0,07 до 0,2 м. Вторым по значимости критерием была выбрана кучность или минимизация ширины полосы выброса грунта. Для модификаций ротора R-20 и R-40 оптимальной скоростью вращения является 20 об/с,

для R-60 оптимальной скоростью вращения является 15 об/с. В результате сравнительного анализа выявлено, что оптимальным выбором конструктивного решения будет модификация ротора метателя R-40 при условии его вращения со скоростью 20 об/с. Годовой экономический эффект от внедрения новой грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем составит 826 067 рублей, срок окупаемости 0,15 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений [Текст]: учеб. пособие / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
2. Алябьев, А. Ф. Оценка эффективности технологических комплексов машин и создание новых средств механизации для лесовосстановления [Текст]: дис. ... д-ра. техн. наук / А. Ф. Алябьев. – М., 2011. – 427 с.
3. Анисимов, Г. М. Основы научных исследований лесных машин [Текст]: учебник / Г. М. Анисимов, А. М. Кочнев. – 2-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 528 с.
4. Аренс, Х. Многомерный дисперсионный анализ [Текст] / Х. Аренс, Ю. Лейтер. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 231 с.
5. Афифи, А. Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ [Текст] / А. Афифи, С. Эйзен. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
6. 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.
7. Бартенев И.М. Математическая модель рабочего процесса ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины/И. М. Бартенев, А.Ф. Петков, Н.С. Камалова//Лесотехнический журнал. 2021. т. 11. № 1 (41). с. 172-180.
8. Бартенев, И. М. Энергосберегающие и природосберегающие технологии в лесном комплексе [Текст]: учеб. пособие / И. М. Бартенев. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. – 107 с.
9. 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.

10. Бартенев И.М. Анализ рабочих процессов роторов-метателей лесопожарных грунтометов-полосопрокладывателей/И.М. Бартенев, А.Ф.Петков, М.А. Попов//Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. т. 8. № 1 (48). с. 23-28.

11. Бартенев И.М. Анализ конструкций и рабочих процессов технических средств для профилактики и тушения лесных пожаров грунтом/И.М. Бартенев, А.Ф.Петков//Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. т. 8. № 2 (49). с. 5-11.

12. Бартенев И.М. Изучение способа тушения лесного низового пожара грунтометом/ И.М. Бартенев, А.Ф. Петков, Н.А. Костеев, А.В. Солнцев//в сборнике: повышение эффективности лесного комплекса. материалы седьмой всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2021. с. 13-15.

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

14. Болгов А.В. Виды обработки почвы/А.В. Болгов, М.В. Шавков, С.В.Малюков, А.Ф.Петков, И.И.Шанин//в сборнике: лесные экосистемы как глобальный ресурс биосферы: вызовы, угрозы, решения в контексте изменения климата. Материалы международного лесного форума. отв. редактор Н.В. Яковенко. Воронеж, 2022. с. 6-12.

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

16. 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.

17. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика:

учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

18. 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.

19. Гнусов М.А. Виды и характеристики лесных пожаров/М.А. Гнусов, С.В. Малюков, А.Ф. Петков//Воронежский научно-технический вестник. 2020. т. 1. № 1 (31). с. 140-146.

20. Гнусов М.А. Тактики тушения лесных пожаров/М.А. Гнусов, С.В. Малюков, А.Ф. Петков//Воронежский научно-технический вестник. 2020. т. 1. № 1 (31). с. 147-153.

21. Гнусов М.А. Математическая модель взаимодействия с грунтом фрезы-метателя лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя/Гнусов М.А., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Петков А.Ф.//Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 159. с. 110-121.

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

23. 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.

24. 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.

25. Григорьев, И. В. Сравнительный анализ противопожарных систем защиты лесных машин [Текст] / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Гри-

горьева, С. А. Войнаш // Строительные и дорожные машины.– М.: СДМ-пресс. – 2019. – № 1. – С. 45-49.

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

27. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике /Х. Гулд, Я. Тобочник. – Ч. 2. – М.: Мир, 1990. – 400 с.

28. Добрынин, Ю. А. Повышение эффективности технической эксплуатации лесосушительных систем на основе разработки технологического комплекса машин [Текст] : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.21.01. / Ю.А. Добрынин. – СПб, 1992. – 35 с.

29. 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.

30. 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.

31. Драпалюк М.В. Оптимизация формализованной модели ротораметателя лесопожарной грунтометательной машины к условиям тушения М.В. Драпалюк, Н.С. Камалова, А.Ф.Петков/Системы. методы. технологии// 2022. № 2 (54). с. 119-124.

32. Драпалюк М.В. Экспериментальная оптимизация параметров фрезы-метателя лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя. М.В. Драпалюк, П.И. Попиков, П.Э.Гончаров, Д.Ю. Дручинин, М.А.Гнусов, Е.В.Поздняков, А.Ф. Петков/ Лесотехнический журнал. 2022. т. 12. № 2 (46). с. 100-114.

33. Драпалюк, М. В. Математическая модель процесса подачи и выбро-

са 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.

34. Драпалюк М.В. Результаты имитационного моделирования рабочего процесса ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины/М.В. Драпалюк, А.Ф. Петков, А.К. Поздняков//Лесотехнический журнал. 2022. т. 12. № 2 (46). с. 89-99.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. Инженерные расчеты на ЭВМ: справ. пособие / под ред. В. А. Тро-

ицкого. – Л.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

40. 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.

41. 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.

42. 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

43. 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.

44. 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.

45. 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.

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

47. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления: учебник для вузов / под ред. А. Б. Лурье. – Л.: Колос. Ленингр.

отд-ние, 1979. – 312 с.

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

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

50. 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 трудов VI междунар. науч.-практич. конф. / редкол. Ю. Ф. Лачуга [и др.]. – 2018. – С. 250-254.

51. 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.

52. 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..

53. Патент на изобретение 2762965 с1, Российская Федерация, МПК E02 F 3/18 Лесопожарная грунтометательная машина-полосопрокладыватель [Текст] / Бартенев Иван Михайлович, Попиков Петр Иванович, Петков Александр Федорович, Поздняков Антон Константинович, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». заявка № 2021121717 от 21.07.2021; опубл. 24.12.2021

54. Патент на изобретение №2762160 с1, Российская Федерация, МПК E02 F 3/18 Лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель [Текст] /Попиков Петр Иванович, Бартенев Иван Михайлович, Поздняков Антон Константинович, Лысыч Михаил Николаевич, Попиков Виктор Петрович, Петков Александр Федорович заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». заявка № 2021117044 от 10.06.2021; опубл.

16.12.2021

55. Пат. 144715 Российская Федерация, А62С 27/00 Грунтомет пожарный фрезерный [Текст] / Д. В.Есков, В.В. Цыплаков, С.В. Фокин, Д.В. Цыбаев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «СГАУ им. Н.И. Вавилова». – № 2014115875/12; заявл. 22.04.2014; опубл. 27.08.2014.

56. Пат. 117091 Российская Федерация, МПК А 62 С 3/00, А 62 С 27/00. Рабочий орган грунтомета лесопожарного [Текст] / Е. И. Максимов, И. С. Федорченко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО СибГТУ. – № 2011154395/12; заявл. 23.12.2011; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. – 5 с.

57. Пат. 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. Бартнев, 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.

58. Пат. 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.

59. Пат. 2541987 Российская Федерация, МПК Е 02F 3/18. Пожарный грунтомет-полосопрокладыватель [Текст] / Бартнев И. М., ЕмтыльЗ. 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.

60. Пат. 2496540 Российская Федерация, МПК А62С 27/00. Пожарный грунтомет-полосопрокладыватель [Текст] / И. М. Бартнев, 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.

61. Перспективные конструкции противопожарных грунтометов

[Текст] / П. Э. Гончаров, П. И. Попиков, М. А. Гнусов, Н. А. Шерстюкова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 54-59.

62. Петков А.Ф. Анализ современного состояния о физических представлениях лесной почвенной среды при ее взаимодействии с режущими рабочими органами/ А.Ф.Петков//В сборнике: современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса. материалы всероссийской научно-практической конференции. отв. редактор И.В. Четверикова. Воронеж, 2021. с. 36-39.

63. Петков А.Ф. Обоснование параметров ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины/ А.Ф.Петков //в сборнике: повышение эффективности лесного комплекса. материалы восьмой всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2022. с. 152-153.

64. Поздняков А.К. Перспективные направления совершенствования лесопожарных грунтометов-полосопрокладывателей/ А.К. Поздняков, А.Ф. Петков // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Воронеж, 2020 г. – С. 410-413.

65. Поздняков А.К. Перспективные направления совершенствования лесопожарных грунтометов-полосопрокладывателей/ А.К. Поздняков, А.Ф. Петков, Н.А. Шерстюков // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества - взгляд в будущее: сборник статей международной научно-технической конференции, в 3-х томах. 2020. с. 184-187.

66. Поздняков А.К. Анализ технических средств для профилактики и тушения лесных пожаров/ А.К. Поздняков, А.Ф. Петков//Воронежский научно-технический Вестник. 2019. Т. 4. № 4 (30). С. 101-106.

67. 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.

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

69. Попиков, П. И. Теоретические исследования рабочего процесса лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим приводом [Текст] / П. И. Попиков, П. Н. Щеблыкин, 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.

70. 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.

71. Попиков, П. И. Математическая модель рабочего процесса лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим гидроприводом [Текст] / П. И. Попиков, П. Э. Гончаров, А. В. Шаров // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7, № 4 (28). – С. 182-189.

72. Попиков, П. И. Повышение эффективности гидрофицированных машин при лесовосстановлении на вырубках / П. И. Попиков. – Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2001. – 156 с.

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

74. Попиков, П. И. Влияние режимов работы лесопожарной грунтометательной машины с гидроприводом на показатели эффективности

[Текст] / П. И. Попиков, В. П. Попиков, А. В. Шаров, А. Ф. Петков, А. К. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2020. –Т. 10, № 1 (37). –С. 209-217.

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

76. Посметьев, В. И. Обоснование перспективных конструкций предохранителей для рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий. Воронеж, 2000. Посметьев, В.И. Повышение эффективности лесовозного автомобиля с помощью рекуперативного гидропривода [Текст] / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 131. – С. 100-113.

77. Посметьев, В. И. Перспективная конструкция лесовозного автомобиля с рекуперативным гидроприводом [Текст] / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5, № 6 (32). – С. 149-152.

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

79. Проскурина, И. Ю. Экономические вопросы в дипломном проектировании [Текст]: учеб. пособие / И. Ю. Проскурина, И. А. Авдеева. – Воронеж: ВГЛТА, 2005. – 81 с.

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

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

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

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

84. 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.

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

86. 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.

87. 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.

88. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020617382, Российская Федерация. Программа для моделирования движения потока почвогрунта в воздушной среде/ М.А. Гнусов, М.В. Драпалюк, В.В. Посметьев, А.Ф. Петков: заявка № 2020616439 от 22.06.2020. опубл. от 06.07.2020.

89. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021669645, Российская Федерация. Программный комплекс для моделирования траектории движения частиц почвогрунта в процессе работы

лесопожарной грунтометательной машины, снабженной многоступенчатым ротором-метателем/ М.В. Драпалюк, Н.С. Камалова, М.А. Гнусов, А.Ф. Петков: заявка № 2021669306 от 01.12.2021. опубл. от 01.12.2021.

90. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022668756, Российская Федерация. Программа для оптического определения характеристик направленного потока почвогрунта на основе лабораторных экспериментальных исследований ротором-метателем /М.В. Драпалюк, М.А. Гнусов, Д.Ю. Дручинин, В.В. Посметьев, А.Ф. Петков: заявка № 2022668391 от 11.10.2022. опубл. 11.10.2022.

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

92. 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.

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

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

95. 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.

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

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

98. Ступников, Д. С. Орудия для профилактики и тушения лесных пожаров [Текст] / Д. С. Ступников // Воронежский научно-технический вест-

ник. – 2015. – № 2-2 (12). – С. 62-67.

99. 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.

100. 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.

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

102. 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.

103. 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.

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

105. 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.

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

107. Фокин, С. В. Перспективы развития переработки низкокачественной древесины и отходов лесозаготовок на вырубках лесостепной зоны западной Сибири [Текст] / С. В. Фокин // Современные тенденции сельскохо-

зяйственного производства в мировой экономике: мат-лы XVII междунар. науч.-практ. конференции. – 2018. – С. 282-286.

108. Фокин, С. В. Современное состояние лесного и лесоперерабатывающего комплекса западной сибирей [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.

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

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

111. 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.

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

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

114. 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.

115. 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.

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

117. Шмойлова, Р. А. Теория статистики / Р. А. Шмойлова. – 4 изд. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 656 с.

118. 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.

119. Popikov, P. I. Increasing the efficiency of the working process of a forest fire ground-sweeping machine with an energy-saving hydraulic drive of the throwing rotor / P. I. Popikov, M. A. Gnusov, V. P. Popikov, A. V. Sharov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng, 1001 012021. – 2020.

120. Ignacio Abascal Rubio, Javier Abascal Rubio, Pedro Abascal Rubio 1995 ES_ Application number: ES9502728U Filing date: 1995-10-27 Legal status: Expired – Lifetime 1996 AU WO «Machine for extinguishing fires by throwing earth» Pat. no. WO1997015352A1 WIPO (PCT)

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

122. Robert J. Banahan 1987 US_ «Fire extinguishing apparatus» Pat. no. US4852656A United States.

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

124. Sabri, Y. Forest fire detection and localization with wireless sensor networks (Conference Paper) [Текст] / Y. Sabri, N. El.Kamoun // 1st International Conference on Networked Systems, NETYS 2013, Marrakech, Morocco, 2-4 May 2013. – Code 98956.

125. Gao, K. T. Forecasting forest fire risk grade of forest sub-compartment (Article) [Текст] / K. T. Gao, P. J. Liu, X. M. Tang // Research Institute of Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China. – 2013. – Vol. 35. – P. 61-66.

126. 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.

127. 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.

128. Gnusov M.A. Simulation of layout schemes of soil-throwing machine-tractor units based on articulated load-bearing machines/Gnusov M.A., Drapalyuk M.V., Lysych M.N., Druchinin D.YU., Petkov A.F.// 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. 32023.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технико-экономическая эффективность лесопожарной грунтометательной машины

Технико-экономические расчеты выполнены по общепринятой методике [56]. Исходные данные для расчета экономической эффективности проектируемого агрегата представлены в таблице А.1

Таблица А.1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности экспериментального образца

Наименование показателя	Единицы измерения	Базовая модель	Проект. модель
Цена орудия (агрегата)	руб.	150000	110000
Часовая производительность орудия (агрегата)	пог.км/ч	1,6	2,2
Время смены	ч	8	8
Число смен		1	1
Годовая загрузка 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.	247	247
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 25	14,3 25
Отчисления на ТО и ремонт: - по орудию - по трактору	%	23 39	23 39
Цена нефтепродуктов	руб.	55	55
Часовой расход топлива	кг	14,9	14,9
Нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений		0,15	0,15

Таблица А.2 - Показатели экономической эффективности внедрения
проектируемого варианта

Показатели	Единицы измерения	Варианты	
		базовый	проектируемый
Производительность орудия:			
- часовая, $P_{ч}$	пог. км	1,6	2,2
- сменная, $P_{см}$		12,8	17,6
- годовая, $P_{год}$		768,0	1056,0
Текущие затраты, приходящиеся на единицу выработки, C	руб./пог.км	2336	1674,3
Удельные капитальные вложения, K_y	руб./пог.км	2793	1989,6
Годовой экономический эффект, \mathcal{E}_2	руб.	—	826067,00
Срок окупаемости	лет	—	0,15

Директор Новоусманского филиала
СГБУ «Лесопожарный центр»



к.с/х.н. Мальшев В.В.

» июля 2022 г.

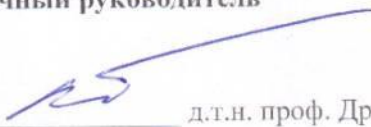
АКТ
**о внедрении законченной научно-исследовательской,
опытно-конструкторской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова в лице руководителя научно-исследовательской (опытно-конструкторской работы, д.т.н. Драпалюк М.В., ответственного исполнителя в лице аспиранта кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Петкова А.Ф. и представитель Новоусманского филиала Специализированного государственного бюджетного учреждения «Воронежский лесопожарный центр», именуемое в дальнейшем «Предприятие», в лице директора Мальшева Владимира Викторовича, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «Обоснование параметров и режимов работы трехступенчатого ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины», выполненной на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, использованы при прокладке минерализованных полос путем использования опытной конструкции лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем.

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 лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем.

Замечания и предложения по дальнейшей работе по внедрению: продолжить исследования в области повышения качества проведения профилактических и лесопожарных операций и снижения энергоемкости грунтометательных машин.

Научный руководитель


д.т.н. проф. Драпалюк М.В.

Исполнитель аспирант


Петков А.Ф.

«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 Драпалюка М.В., ответственного исполнителя в лице аспиранта кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Петкова А.Ф. 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 трехступенчатого ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины», выполненной на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова в 2022г., использованы при проектировании и изготовлении экспериментального образца лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем.

Внедрение результатов исследования дало возможность предприятию получить следующий технико-экономический эффект: за счет использования математической модели рабочего процесса лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем удалось сократить сроки проектирования орудия.


Замечания и предложения по дальнейшей работе по внедрению: продолжить работу по совершенствованию лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем.

Научный руководитель



(подпись) д.т.н., проф. Драпалюк М.В.

Исполнитель, аспирант



(подпись) Петков А.Ф.

РЕКОМЕНДОВАНО:

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



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 Петкова А.Ф. на тему «Обоснование параметров и режимов работы трехступенчатого ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины».

1. Научный руководитель – д.т.н. проф. Драпалюк М.В..

2. Ответственный исполнитель – аспирант Петков А.Ф.

3. Наименование разделов темы, выполненной аспирантом:

а) теоретические исследования рабочего процесса и параметров трехступенчатого ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины;

б) экспериментальные исследования.

4. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.

Разработана математическая модель и новая конструкция лесопожарной грунтометательной машины с трехступенчатым ротором-метателем, 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 М.В. Драпалюк Драпалюк М.В.

Ответственный исполнитель, аспирант А.Ф. Петков Петков А.Ф.

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 ЭЛЕКТРОННОМ ПОДПИСАНИИ
Служба по интеллектуальной собственности
Федеральное агентство по интеллектуальной собственности
Москва, Россия

Г.П. Иллосов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021669645

«Программный комплекс для моделирования траектории движения частиц почвогрунта в процессе работы лесопожарной грунтометательной машины, снабженной многоступенчатым ротором-метателем»

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

Авторы: *Драпалюк Михаил Валентинович (RU), Камалова Нина Сергеевна (RU), Гнусов Максим Александрович (RU), Петков Александр Федорович (RU)*

Заявка № 2021669306

Дата поступления 01 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 декабря 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат безопасности информации № 118
Издатель: ИРИС-Центр
Действителен с 15.01.2018 по 15.01.2025

Г.П. Илизеев