



На правах рукописи

Гнусов Максим Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И
ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНЫХ МАШИН**

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Воронеж 2023

(оборотная сторона обложки)

Работа выполнена в Воронежском государственном лесотехническом университете имени Г.Ф. Морозова

(наименование организации)

Научный консультант доктор технических наук, Драпалюк М.В.

(ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество (при наличии))

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	7
1	Современное состояние проблемы.....	17
1.1	Анализ исследований современного состояния вопросов ликвидации и предупреждения лесных низовых пожаров.....	17
1.2	Анализ существующих стендов для исследования процессов лесного низового пожара и его тушение.....	21
1.3	Анализ пассивных и активных методов борьбы с лесными пожарами.....	23
1.4	Анализ существующих численных и имитационных методов моделирования взаимодействия рабочих органов землеройных и грунтометательных машин с почвенными средами.....	26
1.5	Анализ конструкций и рабочих процессов лесохозяйственных машин для предупреждения и тушения лесных пожаров.....	32
1.6	Цель и основные задачи диссертационного исследования.....	48
2	Установление закономерностей влияния физических и геометрических параметров лесного грунта на эффективность пожаротушения.....	50
2.1	Подготовка проведения однофакторного лабораторного эксперимента.....	50
2.2	Разработка и описание лабораторного стенда.....	51
2.3	Методика проведения однофакторного лабораторного исследования.....	51
2.4	Проведение однофакторного лабораторного эксперимента....	53
2.5	Выводы.....	73
3	Обоснование технологии применения грунта для борьбы с лесными пожарами.....	75

3.1	Модель процесса тушения лесного пожара потоком грунта....	75
3.2	Механика и термодинамика тушения низового лесного пожара потоком грунта (методика моделирования).....	77
3.3	Моделирование термодинамических особенностей процесса тушения лесного пожара.....	83
3.4	Исследование на основе модели процесса тушения лесного пожара потоком грунта.....	91
3.5	Исследование параметров грунтометательной машины, оказывающие наибольшее влияние на эффективность тушения лесного пожара.....	95
3.6	Исследование влияния параметров лесного пожара на эффективность его тушения.....	98
3.7	Выводы.....	98
4	Разработка и исследование модели движения грунта в воздушной среде.....	101
4.1	Модель движения потока грунта в воздушной среде.....	101
4.2	Методика моделирования представления воздуха и почвы.....	101
4.3	Исследование на основе модели процесса движения грунта в воздушной среде.....	108
4.4	Исследование воздействия характеристик потока грунта на характер его движения в воздушной среде.....	110
4.5	Исследование входа потока грунта в область нагретого воздуха.....	116
4.6	Выводы.....	118
5	Исследование процесса качественных показателей движения грунта в воздушном пространстве.....	120
5.1	Исследование метода для определения характеристик потока грунта в воздушном пространстве.....	122
5.2	Определение фрагментов изображения, перемещающихся от кадра к кадру.....	130

5.3	Определение дискретности потока: выброса каждой лопастью.....	131
5.4	Методика определения характеристик потока грунта по видеоряду.....	133
5.5	Математический аппарат для выделения потока грунта от фона.....	133
5.6	Исследование распределения плотности потока грунта в вертикальной поперечной плоскости.....	141
5.7	Исследование распределения в вертикальной поперечной плоскости абсолютного значения скорости частиц грунта.....	143
5.8	Исследование распределения в вертикальной поперечной плоскости вектора скорости частиц грунта.....	144
5.9	Исследование углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) плотности метания грунта.....	145
5.10	Исследование углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) скорости метания грунта.....	145
5.11	Исследование распределения плотности оседания грунта на поверхности.....	146
5.12	Исследование характеристик движения потока грунта в горизонтальной плоскости.....	147
5.13	Сравнение результатов полевого эксперимента и моделирования грунтометательной техники.....	150
5.14	Сравнение траекторий движения грунта.....	150
5.15	Сравнение эпюр покрытия поверхности.....	152
5.16	Выводы.....	153
6	Теоретическое исследование грунтометательной машины.....	156
6.1	Описание грунта в модели.....	157
6.2	Представление грунтометательной машины в целом.....	163
6.3	Описание передвижения грунтометательной машины в модельном пространстве.....	175

6.4	Теоретическое обоснование параметров грунтометательной машины.....	184
6.5	Исследование влияния длины почвопровода на качественные и количественные показатели грунтометательной машины	188
6.6	Исследование влияния диаметра почвопровода на качественные и количественные показатели грунтометательной машины	190
6.7	Исследование влияния угла наклона и высоты расположения почвопровода.....	193
6.8	Оптимизация параметров размещения почвопровода.....	198
6.9	Исследование эффективности грунтометательных машин на склонах.....	203
6.10	Исследование влияния угла поперечного склона.....	204
6.11	Исследование влияния угла продольного склона.....	208
6.12	Выводы.....	210
7	Определение оптимальных вариантов создания потока грунта и разработка рекомендаций для создания грунтометательных машин.....	213
7.1	Исследование основных показателей работы грунтометательной машины с гидроприводом грунтометательного механизма.....	213
7.2	Корреляционно-регрессионный анализ результатов разведывательного эксперимента.....	252
7.3	Экспериментальное исследование воздействия характеристик базовой грунтометательной машины на показатели её работы.	260
7.3.1	Анализ экспериментальных данных по выявлению закона распределения выходных величин.....	260
7.3.2	Построение регрессионной модели влияния на полноту тушения лесного низового пожара базовой грунтометательной машиной.....	264

7.3.3	Анализ влияния параметров базовой грунтометательной машины на полноту тушения лесного пожара.....	268
7.4	Оптимизация параметров грунтометательной машины.....	285
7.5	Выводы.....	286
8	Оценка технико-экономической эффективности и разработка рекомендаций по использованию результатов исследования...	288
8.1	Определение показателей сравнительной эффективности.....	288
8.2	Анализ себестоимости производства продукции (эффективности технологии) по сопоставимым аналогам.....	288
8.3	Определим текущие затраты для базовой и проектируемой модели машины для тушения лесных пожаров.....	292
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	299
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	308
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	339
	Акты внедрения результатов научно-исследовательской работы в практическую деятельность и в учебный процесс.....	339

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одна из наиболее значимых проблем лесного хозяйства – борьба с лесными пожарами, которая в настоящее время вышла за рамки лесной отрасли и стала важной частью охраны природы и окружающей среды, стала социально-государственной задачей в области обеспечения безопасности населённых пунктов и жизни человека. На планете ежегодно лесной пожар преодолевает более 340 млн. га. природных территорий (включая площади леса).

В соответствии с Основами государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года, утверждёнными распоряжением Правительства РФ от 26 сентября 2013 года № 1724-р, для реализации государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов необходимо интенсифицировать использование и воспроизводство лесов.

В настоящее время защита и сохранение лесных ресурсов согласно основным нормативно правовым актам, приказам, постановлениям и иным нормативным документам, определяющим выполнение работ по созданию технических средств для предупреждения и тушения лесных пожаров в РФ, обозначены в распоряжении правительства РФ «Распоряжение от 20 сентября 2018 г. №1989-р об утверждении стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года», Стратегии научно-технологического развития РФ, ЛК РФ ПП «Об утверждении Правил разработки и утверждения плана тушения лесных пожаров и его формы».

В современных условиях, вызванных глобальными климатическими изменениями на нашей планете, возросли требования к уровню охраны леса, что стимулирует повышение требований к разрабатываемой технике и потребности в совершенствовании и разработке средств для противопожарных работ с наращиванием материальных ресурсов лесопожарных служб. В современном

обществе при противопожарных работах на практике используются орудия с пассивными рабочими органами, которые значительно сужают возможности, в особенности при активном виде тушения кромки пожара, и ограничивают ширину минерализованных полос размерами применяемой машины. А использование машин, тушащих водой и/или химическими растворами, значительно повышает требуемое количество ресурсов для предупреждения и тушения кромки лесного пожара.

Проанализировав научно-технологические документы и распоряжения правительства РФ, заметна тенденция по импортозамещению с развитием вектора совершенствования технического процесса и конструктивно-технологических возможностей существующей техники. Грунтометательная техника, предназначенная для тушения пожаров при помощи прокладки минерализованных полос, а также засыпки кромки грунтом, является востребованной из-за своей универсальности.

Научно-технические и производственные процессы переходят в цифровую среду. Работы по предупреждению лесных пожаров включают целый ряд мероприятий: создание минерализованных полос, расчистку лесных территорий от ветровалов и буреломов, что позволяет оздоровить лес и повысить его экологическую и экономическую ценность. Тушение лесных пожаров при помощи грунта относится к экологически чистым технологиям.

Выбор направления диссертационных исследований обусловлен тем, что не в полной мере изучены технологические процессы и выполнены научные исследования по системе процессов, входящих в технологию тушения полосы лесного низового пожара, распространяющегося по гумусовым отложениям в нижнем ярусе леса. Не полностью изучены движение грунтового потока в воздушном пространстве, взаимодействие грунта с горячей кромкой, с учетом выбора конструктивно-технологической схемы грунтометательной техники.

В теоретической базе научных исследований грунтометательных машин, параметров и режимов работы основных рабочих органов не полностью обоснованы состояние проблемы и технико-технологические решения,

направленные на совершенствование конструктивных характеристик основных и вспомогательных рабочих органов грунтометательных машин. Остаются нерешенными основные задачи фундаментального описания технологического процесса порционного тушения грунтом кромки низового пожара и не определены закономерности физико-механических свойств лесного грунта, движимого в воздушной среде на горящую кромку.

Таким образом, тема «Совершенствование технологического процесса и обоснование параметров лесохозяйственных грунтометательных машин» является актуальной. Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» «Разработка ресурсо- и экологосберегающих технологий и обоснование типа и параметров рабочих органов машин для лесовосстановления и лесоразведения в лесостепной и степной зонах РФ» (№ гос. Регистрации 01201168736) и в рамках проекта «Разработка технологии и комбинированной машины для предупреждения и ликвидации лесных пожаров» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», по гранту РФФИ 2019 «Совершенствование методологической базы моделирования систем и процессов ликвидации лесных пожаров направленно-регулируемым потоком грунта», 2019-2022 гг.

Степень разработанности: Вопросами изучения предупреждения и ликвидации природных пожаров в настоящее время занимаются учёные многих стран. Это связано с высоким процентом гибели лесных массивов от лесного пожара и угрозы для социально-общественной деятельности. Подавление лесного пожара грунтом имеет высокую эффективность за счёт неограниченного количества доступного материала с возможностью его перемещения в зону кромки лесного низового пожара, а также с одновременным созданием минерализованной противопожарной полосы на пути движения кромки лесного низового пожара по гумусовым лесным отложениям.

Теоретическое исследование опубликованных научных работ по теме диссертационных исследований показывает, что взаимодействие рабочих

органов лесных машин с почвенной средой в разное время исследовалось В.П. Горячкиным, А.Н. Зелениным, Н.Е. Резником, Ю.А. Ветровым и другими. Учёными рассмотрены такие теоретические вопросы, как теория масс и скоростей, удара и разрушения материалов, клина, резания и теория подобия физических процессов. Исследованы разновидности процесса резания лезвием на основе дифференциации технологических факторов. Кроме этого, к настоящему времени выполнен ряд исследований процессов по ликвидации лесных пожаров грунтом и формированию противопожарных минерализованных полос такими учёными, как И.М. Зима, А.И. Баранов, Г.А. Ларюхин, И.М. Бартенев, Ю.А. Добрынин, Ю.М. Жданов, В.В. Чернышов, А.Н. Чукичев, П.М. Кодляков, Н.П. Валадайский, В.И. Посметьев, В.И. Казаков, М.В. Драпалюк, П.И. Попиков, П.Э. Гончаров, J.J. Podur и другими.

Общие особенности возникновения очага, протекания и распространения ландшафтных пожаров рассмотрены в работах Е.С. Арцыбашева, И.С. Мелехова, Г.А. Амосова, Э.Н. Валендика, А.М. Гришина, С.И. Душа-Гудымы, Г.Н. Коровина, Н.П. Курбатского, В.А. Белова, П.М. Матвеева и других. Наряду с отечественными работами также следует отметить некоторые труды зарубежных учёных, таких как М.Е. Alexander, Н.Е. Anderson, J.G. Goldammer, B.D. Lawson, B.J. Stocks, С.Е. Van Wagner, С.В. George, A.D. Blakely, G.M. Johnson и других.

Анализ научных работ показывает, что не полностью исследован процесс тушения и предупреждения лесного низового пожара, распространяющегося по нижней части гумусовых отложений при условии тушения порциями грунта, посылаемого механическим способом. Разработка и создание грунтометательной техники требует более глубоких теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования направленного потока грунта, подаваемого на кромку лесного низового пожара,двигающегося по нижней части гумусовых лесных отложений.

Цель и задачи:

Целью работы является совершенствование грунтометательной техники путем научного обоснования технологического процесса и разработки рабочих органов.

Задачи исследования:

1. Проанализировать состояние проблемы, технологию работы и технико-технологические схемы грунтометательных машин с направленным потоком грунта;

2. Разработать математические модели процесса тушения и взаимодействия основных рабочих органов грунтометательных машин с грунтом;

3. Исследовать технологические процессы тушения пожара, движение в воздушном пространстве грунта и взаимодействие его с рабочими органами машины;

4. Установить закономерности процесса работы базовой грунтометательной машины, обосновать и оптимизировать основные параметры рабочих органов;

5. Установить зависимости влияния движения грунта в воздушном пространстве и геометрических, кинематических характеристик грунтометательных машин на процесс механического и теплового тушения пожара;

6. Определить качественные и технико-экономические показатели работы грунтометательных машин и разработать рекомендации по их рациональному применению.

Объектом исследования являются конструкции, технологические процессы и рабочие процессы грунтометательных машин.

Предметом исследования являются рабочие узлы и технологические операции грунтометательных машин.

Научная новизна результатов работы:

1. Новые технико-технологические решения для совершенствования параметров грунтометательных машин с направленным потоком грунта, отлича-

ющиеся повышенной эффективностью в условиях уплотненных связных и насыщенных древесно-кустарниковой растительностью грунтов;

2. Математические модели процесса тушения и взаимодействия основных рабочих органов грунтометательных машин с направленным потоком грунта, отличающиеся учетом физико-механических свойств грунта;

3. Закономерности движения в воздушной среде направленного потока грунта, подаваемого грунтометательными машинами, отличающиеся учетом коэффициента сплошности, скоростью достижения поверхности и параметрами формируемой полосы;

4. Закономерности рабочего процесса базовой грунтометательной машины на основе метода динамики частиц, отличающиеся учетом плотности, скорости метания грунта и плотности оседания грунта на горящую поверхность;

5. Зависимости влияния движения грунта в воздушном пространстве на процесс механического и теплового тушения пожара, отличающиеся учетом геометрических, кинематических характеристик грунтометательных машин;

6. Качественные и технико-экономические показатели работы грунтометательных машин, отличающиеся учетом воздействия внешней среды с конструктивно-технологическими особенностями рабочего процесса новых грунтометательных машин, используемые для разработки рекомендаций по их рациональному применению.

Теоретическая значимость работы заключается в углублении теории процессов взаимодействия параметров пассивных и активных рабочих органов с грунтом и их влиянии на энергетические показатели процессов его перемещения; расширении теории теплового и механического воздействия грунта на процессы тушения лесной подстилки; расширении теоретических положений движения фрагментов сыпучих грунтов в воздушной среде вблизи источника высокой температуры лесного пожара.

Практическая значимость работы заключается в апробации технологического процесса тушения кромки лесного пожара поверхностным слоем грунта; совершенствовании конструкций и повышении эффективности

грунтометательных машин различных типов; разработке конструкций различных типов грунтометательных машин, содержащих грунтометательный механизм оригинальной конструкции, дисковые рабочие органы и кожухи-направители, защищенные патентами РФ; разработке рекомендаций, обеспечивающих сокращение сроков и повышение качества проектирования конструкций рабочих органов грунтометательных машин различных типов.

Методы исследования: Научные исследования в диссертационной работе выполнены методами эмпирического и теоретического познания. Выполнены наблюдения явлений процесса тушения лесного низового пожара при помощи порций грунта, работа грунтометательной машины, в частности каждого рабочего органа в отдельности. Произведено накопление и отбор фактов, установлены взаимосвязи. Теоретические исследования выполнялись по имитационным моделям с элементами теоретической механики, математики, физики, а также с помощью численных методов. Экспериментальные исследования выполнены на стендах и установках в лабораторных и полевых условиях. Опытные данные получены при помощи тензометрической лаборатории с первичной обработкой результатов на ЭВМ и последующей статистической обработкой. Полевые испытания записывались на камеру с оцифровкой получаемых данных на ЭВМ при помощи программного алгоритма.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Техничко-технологические решения, обеспечивающие повышение энергоэффективности технологических процессов и конструктивных параметров рабочих органов грунтометательных машин, позволяющие повысить эффективность рабочего процесса грунтометания в условиях уплотненных связных и насыщенных древесно-кустарниковой растительностью грунтов;

2. Математические модели процесса тушения пожара и взаимодействия основных рабочих органов грунтометательных машин с грунтом, позволяющие обосновать технологию процесса тушения лесного пожара;

3. Закономерности процесса движения в воздушной среде направленного потока частиц грунта, подаваемого грунтометательными машинами, позволяющие повысить качество формирования целевой полосы;

4. Закономерности рабочего процесса эффективного перемещения грунта, позволяющие обосновать конструктивно-технологические параметры грунтометательных машин;

5. Зависимости влияния геометрических и кинематических характеристик конструкции рабочих органов и параметров грунта вблизи источника пожара, позволяющие повысить эффективность процесса механического и теплового тушения пожара;

6. Качественные и технико-экономические показатели работы различных типов грунтометательных машин, позволяющие повысить эффективность их использования в лесохозяйственном производстве.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, соответствуют паспорту научной специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины», п. 5. Компоновка, типы, параметры и режимы работы машин лесохозяйственных и лесопромышленных производств; п. 7. Технологические комплексы, производственные процессы, поточные и автоматические линии, машины и агрегаты в лесном хозяйстве и лесной промышленности.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов и выводов теоретического исследования обеспечена корректностью постановки задач, применением современных методов получения и обработки исходной и получаемой информации, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов. Достоверность результатов экспериментального исследования базируется на использовании современных методик и экспериментального оборудования, подтверждена обоснованным объемом экспериментального материала, а также положительными

результатами испытаний опытных образцов в реальных условиях эксплуатации на лесных объектах.

Основные результаты научной работы представлены на научных конференциях различного уровня, прошедшие на базе следующих площадок: «Воронежский государственный лесотехнический университет» (г. Воронеж, 2018-2022 гг.); «Белорусский государственный технологический университет» (г. Минск, 2019 г.); Международной научно-практической конференции (г. Петрозаводск, 2020 г.); Международной научной конференции «ICMSIT-2020» (г. Санкт-Петербург – Красноярск, 2020 г.); Международной конференции «CAMSTech-2020» (г. Красноярск, 2020 г.); Международной научной конференции «ICMSIT II-2021» (г. Санкт-Петербург – Красноярск, 2021 г.); Международной конференции «CAMSTech II-2021» (г. Красноярск, 2021 г.).

Результаты работы внедрены, использованы и апробированы в: СГБУ ВО «Воронежский лесопожарный центр» (2023 г.), УОЛ ВГЛТА (Воронеж 2014 - 2023 г.), ООО «СТАЛЬ-СИНТЕЗ» (г. Воронеж 2014 г.), ФГБУ «ПТЦ ФПС ПО ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ» (г. Воронеж 2014 г.), в учебный процесс Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (г. Воронеж, 2014 - 2023 г.) и ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (г. Воронеж, 2023 г.), в «Управление лесного хозяйства Воронежской области» (г. Воронеж, 2023 г.)

Публикации по теме диссертационного исследования опубликованы в 50 работах общим объёмом 22 п.л. (авторский объём – 18,5957 п.л.), в том числе, 3 патента на изобретения и 10 свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ общим объёмом 10,875 п.л. (авторский объём – 3,18615 п.л.), 7 свидетельств об официальной регистрации баз данных, 10 статей общим объёмом 7,375 п.л. (авторский объём – 7,324 п.л.) в рецензируемых периодических научных изданиях, рекомендованных, 16 статей общим объёмом 6,125 п.л. (авторский объём – 4,2136 п.л.) в рецензируемых

периодических изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Без соавторов опубликованы 0 научные работы.

Личный вклад автора. Заключается в обосновании актуальности темы, формулировании цели и задач исследования, выборе и разработке новых математических моделей и методов их реализации, составлении программ проведения лабораторных и полевых экспериментов, анализе полученных теоретических и экспериментальных данных, разработке и внедрении результатов исследования, и подготовки публикаций по теме исследования.

Структура и объем работы

Текст диссертации состоит из введения, восьми разделов, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем рукописи составляет 352 печатных страницы, из них 329 страниц основного текста и одного приложения. В структуре рукописи содержится 146 иллюстраций, 38 таблиц и 205 наименований использованных библиографических источников.

1. Современное состояние проблемы

1.1. Анализ исследований современного состояния вопросов ликвидации и предупреждения лесных низовых пожаров

Лесной фонд Российской Федерации соответствует объему в 1179 млн га, что равняется 31 % от общей площади зеленых зон планеты [219, 138], лесные участки страны составляют около 70 % от всей территории [129]. Стихийный, неконтролируемый и неуправляемый пожар в лесном массиве в кратчайшие сроки способен нанести непоправимый ущерб лесному фонду планеты, снизить экологическую составляющую в районе, нанести ущерб биогеоценозу. Указанные причины делают его одним из основных источников гибели лесных массивов. Официальные данные только по 2019 году показывают значения выше 13 тысяч очагов лесных пожаров на суммарной площади, пройденной более 10 млн га [128, 159].

Процесс лесовосстановления в районах, подвергшихся лесным пожарам, затруднителен и занимает десятилетия. Лесной фонд подвергается значительным потерям из-за неконтролируемого стихийного бедствия.

Главную угрозу жизни и здоровью людей причиняет не только лесной пожар, а также и выделяемые при этом процессе вещества от горящих деревьев и лесной подстилки. Смог содержит такие органические соединения, как метан, бензапирены, формальдегиды, неорганические соединения, оксид углерода, сажа, диоксид азота, озон [103].

Самостоятельное беспрепятственное передвижение лесного низового пожара по массиву с выжиганием травянистой растительности, древесно-кустарниковых культур, молодых деревьев и устоявшегося лесного фонда принято считать лесным пожаром [147, 149, 208, 209, 211]. Сведения с данными о распространении лесного пожара и характере движения кромки несут ключевую роль в составлении стратегии по тушению и обеспечению

безопасности для нетронутых территорий [91]. Как показывает ряд исследований, основными источниками, несущими угрозу для лесного фонда, служат климатические условия, окружающая местность, скопленный объем биологического топлива в нижних ярусах и, исходя из показателей последнего времени, стоит учитывать жизнедеятельность человека [123, 147, 149].

Лесные пожары можно разделить: по силе, по скорости распространения и по месту возникновения. Сила пожара характеризуется величиной площади охваченной. Для определения силы используется классификация из 6 уровней. Скорость распространения лесного пожара зависит от восприимчивости лесного массива к этому процессу, а это в свою очередь зависит от коэффициента теплопроводности материалов, которые находятся в лесу. По скорости выделяют беглые и устойчивые лесные пожары. И последний критерий для возникновения и развития лесного пожара – это место возникновения. Выделены три типа: низовые, верховые и подземные. Лесной пожар охватывает разные части леса: деревья, траву, кустарник, мхи [209, 210, 211].

Величина сгоревшего лесного массива связана с невозможностью доставки требуемых (технических) ресурсов в близлежащий район лесного низового пожара. Лесопожарная техника – это в основном массивные технические средства с невысокой скоростью поступательного движения, так как основная цель – это предупредить дальнейшее распространение и потушить лесной низовой пожар. С увеличением объема лесного пожара возрастает нанесенный ущерб и повышается уровень сложности для его ликвидации. При данных обстоятельствах требуется увеличивать количество человеческих ресурсов и технических средств [209, 210, 211].

В ходе проведения работ по ликвидации лесного пожара применяются два метода – прямой и косвенный. Первый силами человека предполагает тушение кромки лесного низового пожара, а также с очищением верхнего слоя биологического топлива на пути движения кромки лесного низового пожара. А при косвенном методе происходит расчистка верхнего слоя, его увлажнение,

для снижения пожароопасности, а периметр применения очерчен за пределами распространяющегося лесного пожара [15, 23, 24, 59].

Общепринято делить пожары на верховые и низовые. Каждый из видов несет различный объем ущерба и имеет разную форму распространения по лесному массиву. Верховое распространение лесного пожара принято считать верховым и такой вид является самым быстрым по распространению. Еще один вид называется низовым лесным пожаром, и его кромка продвигается по рыхлым поверхностям лесной подстилки, по низовым веткам деревьев, по молодому подросту. Третий вид лесного пожара относится к подземным или почвенным (торфяным) пожарам которые выжигают биотопливо под лесной подстилкой с наименьшей скоростью распространения, но при этом наносят наибольший ущерб из всех видов и слабо поддаются контролю [20-23, 90, 91, 137].

Проводимые на сегодняшний день научно-исследовательские работы в области охраны лесного комплекса от пожаров выделяются своим комплексным характером, многообразием подходов. В качестве инструментов при проведении научно-исследовательской работы часто применяют методы математического и имитационного моделирования.

В научно-исследовательских работах российских и зарубежных исследователей отмечается эффективность тушения лесных пожаров механизированными средствами при помощи грунтометательных машин [74, 78, 89, 103, 107, 123].

Лесной пожар возможен при наличии трех элементов: биотоплива, сопутствующих климатических условий, и наличия источника. Элементами биотоплива являются деревья, кустарники, трава и т.д. В качестве источника могут быть окружающая среда или деятельность человека [32, 57].

Выбор мероприятий по тушению пожара определено на основании характеристик лесного пожара, к основным характеристикам относится скорость движения кромки по нижним гумусовым отложениям, климатические условия, направление и скорость ветра, рельеф местности. Все эти характеристики требуются для подбора средств требуемых для проведения

противопожарных работ и выбора средств. Использование грунтометательных средств дополнительно потребует обладать информацией по влажности и плотность верхних слоев грунта [33-40, 172].

В процессе разрешения практических вопросов по сохранению лесных насаждений от лесных низовых пожаров и выполнения ряда запланированных противопожарных работ проводятся исследования процессов лесного пожара и типов лесных насаждений. В пирологии составлены «шкалы природной пожарной опасности с учетом лесорастительных условий» (И.С. Мелехов).

Лесные пожары разделяют по причинам появления: природного возникновения или связанные с деятельностью человека. К природным факторам следует относить вулканическую деятельность, самовоспламенение от молний, самовоспламенение месторождений угля и торфа. Все остальные факторы возникновения относятся к деятельности человека. Еще одной важной особенностью является путь движения лесного пожара, например, начинается внизу склона и движется вверх, а возможно начинается в верхней точке и двигается вниз по склону.

Теоретическое исследование с составлением математических моделей по распространению лесного пожара выполнено учеными-пирологами. Наука «лесная пирология» подверглась нескольким ступеням развития. Фундамент был заложен советскими учеными-лесоводами. Впоследствии направление претерпело совместное интегрирование со смежными научными областями. Исследование возникновения и распространения лесных пожаров происходило в естественных и лабораторных условиях, что позволило получить скоростные характеристики продвижения лесного пожара. Дальнейшее развитие позволило описать часть протекающих процессов, связанных с лесными пожарами в виде физико-математических моделей, а также выполнить научные изыскания характеристик скоростных режимов лесных пожаров.

Проведение мероприятий по тушению и предупреждению лесных пожаров, как правило, осложняется рядом факторов, например: формой кромки распространения лесного пожара, отсутствием свободного подъезда для

наземной техники и зачастую большими объемами горячей площади лесного массива. Описанные факторы не позволяют полностью контролировать лесной пожар [76, 77, 84, 91, 127, 128].

Для повышения качественных характеристик процесса тушения лесного пожара направленным потоком грунта требуется проведение углубленных научных исследований процессов, протекающих при лесном низовом пожаре. Требуется определить оптимальные характеристики метания грунта, а также описать процесс движения его в воздушном пространстве. Проведение указанных научных исследований позволит определить конструктивно-технологические параметры грунтометательных машин, предназначенных для предупреждения и тушения кромки лесных пожаров грунтом.

В связи с этим, актуальными вопросами на сегодняшний день являются – разработка имитационных моделей отрыва почвенного пласта грунтометательным механизмом (фрезой, фрезой-метателем, фрезерным барабаном, многоступенчатым фрезерным рабочим органом и т.д.), движение в воздушной среде и взаимодействие грунта с кромкой лесного низового пожара, определение режимов и характеристик, отвечающих за ликвидацию лесного пожара и разработку технических средств, способных обеспечить подавление движущейся кромки лесного низового пожара при помощи грунта.

1.2. Анализ существующих стендов для исследования процессов лесного низового пожара и его тушение

В процессе проведения диссертационных исследований требовалось всесторонне рассматривать проблематику возникновения, распространение и процесса тушения лесного низового пожара. Анализ существующих исследований в выбранной области позволил верно определить проблему и сформировать задачи для ее решения.

В Ленинградском научно-исследовательском институте лесного хозяйства разработан и запатентован стенд для исследования процессов пожара

и определения эффективности процессов его тушения огнетушащими веществами. Стенд оснащён водоприёмником, который установлен таким образом, что существует возможность его перемещения относительно зоны распространения пожара. Установлено средство для контроля затрачиваемой массы огнегасящего вещества и средство контроля массы остатков непрореагировавшего огнегасящего вещества, а также сетка, монтируемая с целью имитации пожара и вентилятор [238].

Известен стенд для исследования процессов протекающих при пожаре и исследования его тушения. Стенд разработан как экспериментальное оборудование, предназначенное для моделирования очагов пожара класса С, и оценки эффективности применяемых различных средств при тушении горючих газов [240].

В Военном учебно-научном центре Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Н.Г. Кузнецова» был разработан стенд для исследования процессов прекращения пожара [232]. Изобретение относится к экспериментальному лабораторному оборудованию, которые занимаются разработкой средств и способов пожаротушения. Для повышения точности и надёжности определения параметров прекращения моделируемого пожара, который помещён в реакционный цилиндр при заданных начальных значениях повышенного давления и содержания кислорода газовой среды, за счёт поддержания постоянной концентрации объёма кислорода и огнетушащего вещества в реакционном цилиндре в процессе исследования. В стенде для исследования процессов прекращения пожара реакционный цилиндр имеет дистанционное управление двухстворчатой крышкой на горловине, лифт опускания и подъёма модельного пожара, устройство поджога пожара, трубопроводы подачи газов и огнетушащих веществ, взятия проб на анализ компонентов газовой среды и систему видеонаблюдения за процессом.

Существующие стенды не удовлетворяют требованиям поставленной задачи по исследованию процесса тушения порцией грунта, требуется установка, оснащённая датчиками для снятия показаний по разным уровням в

почвенной среде.

1.3. Анализ пассивных и активных методов борьбы с лесными пожарами

В ходе процесса тушения и предупреждения дальнейшего распространения обнаруженного лесного пожара чаще всего устанавливаются две основные задачи: остановить продвижение кромки лесного низового пожара и затушить кромку совместно со всеми проявлениями лесного пожара [221]. Следует учитывать, что немаловажным фактором при этом является снижение уровня ущерба, наносимого лесному массиву, но при минимальных затратах ресурсов. В процессе тушения одного из основных компонентов: биотоплива со снижением температуры в зоне кромки лесного пожара и прекращения поступления кислорода, происходит тушение кромки лесного низового пожара. Верхний слой биотоплива удаляется механически или снижаются его свойства пожароопасности при помощи повышения влажности или засыпки грунтом. Вода и водные растворы наиболее часто используются при ликвидации лесного пожара, но в больших объемах применение нерационально, а для охлаждения верхнего слоя лесной подстилки требуются в увеличенном объеме, что делает их не настолько универсальными средствами при проведении противопожарных работ [221].

В процессе проведения аналитических научных исследований определены основные известные методы тушения кромки лесного низового пожара:

- тушение кромки лесного низового пожара при помощи воды и водных растворов [53, 177, 142, 175];
- тушение кромки лесного низового пожара с применением химических реагентов [218];
- тушение кромки лесного низового пожара при помощи воздушных пушек [145, 214];
- тушение кромки лесного низового пожара при помощи авиабомб [213];

- тушение кромки лесного низового пожара при помощи грунта [85, 95, 105, 163, 237].

Нестабильная климатическая обстановка и порывистый ветер делают неэффективными ряд указанных методов тушения. Обход контрольных линий пожаром происходит при изменении климатических условий, в частности, направление ветра. А при повышении скорости ветра возможны переносы продуктов лесного пожара на достаточно большие расстояния. Падение горящих деревьев на созданные искусственные барьеры способствует процессу распространения лесного пожара [136, 137].

Грунт относится к экологически чистым и высокоэффективным средствам борьбы с лесным пожаром [137]. Подавление лесного низового пожара грунтометанием имеет высокую эффективность за счёт неограниченного объема грунта с возможностью его перемещения на кромку лесного низового пожара, а также возможности его оперативного использования с одновременным созданием минерализованной противопожарной полосы. Проведение работ, направленных на тушение и предупреждение лесного низового пожара механизированными средствами с проведением научных исследований связано с периодом механизации лесного хозяйства, и на текущий день созданы грунтометательные машины, различающиеся по рабочим характеристикам и с различным назначением, отличающихся по конструкции и технологическому процессу [123, 147-149]. При широком разнообразии конструктивных и технологических решений грунтометательных машин объединяет их установленный быстро вращающийся рабочий орган – грунтометательный механизм (фреза, ротор, фреза-метатель и т.д.). Основное направление потока грунта осуществляется через фрезерование лесного почвенного покрова, поднятие снятого пласта грунта в воздух и придание ему механического импульса [150].

Основными нормативно-правовыми актами и другими документами, регламентирующими организацию профилактики и непосредственное тушение лесных пожаров в РФ, являются: распоряжение правительства Российской

Федерации «Распоряжение от 20 сентября 2018 г. № 1989-р об утверждении стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» и стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», Лесной кодекс, ПП «Об утверждении Правил разработки и утверждения плана тушения лесных пожаров и его формы»; ПП «О привлечении сил и средств федеральных органов исполнительной власти для ликвидации ЧС в лесах, возникших вследствие лесных пожаров»; Приказ Минприроды «Об утверждении Правил тушения лесных пожаров»; Методические рекомендации МЧС России по организации работы органов управления РСЧС в пожароопасный сезон.

Согласно законодательству, в отношении осуществления мер пожарной безопасности в лесах существует разграничение полномочий, а именно: Минприроды России и его подведомственное Федеральное агентство лесного хозяйства РФ (Рослесхоз) отвечают за леса, функции, по охране которых никому не переданы, а также за леса, расположенные на землях особо охраняемых природных территорий федерального значения.

Минобороны РФ и другие органы власти в сфере обороны и безопасности (ФСБ, Росгвардия, ФСО, ГУСП и т.д.) отвечают за лесное хозяйство, расположенное на землях обороны и безопасности. Органы исполнительной власти субъекта в сфере лесных отношений отвечают за леса, которые находятся в собственности субъекта (к примеру, Министерство лесного хозяйства Республики Татарстан или Комитет лесного хозяйства Московской области). При этом, функции по координации всех сил и средств тушения лесных пожаров возлагаются исключительно на РОСЛЕСХОЗ и его оперативный штаб (штабы). Согласно «ГОСТ 17.6.1.01-83 Охрана природы (ССОП). Охрана и защита лесов. Термины и определения», лесной пожар представляет собой неконтролируемое горение, распространяющиеся по лесной площади.

Выполнение эффективных действий в процессе работы по ликвидации лесных пожаров и проведении подсчета объема понесенного ущерба, а также проведение мероприятий, направленных на посадку и восполнение лесных ресурсов, необходимо обладать основными характеристиками лесного пожара: объемом территории, охваченной пламенем, длиной кромки и расстоянием пройденным лесным пожаром [109].

Для разработки высокоэффективных грунтометательных машин для тушения и предупреждения лесных пожаров требуется выполнить комплекс научных исследований, направленных на определение этапов тушения лесного пожара порциями грунта при разной интенсивности горения, найти важнейшие проблемные зоны в этом процессе. Составить имитационную модель процесса тушения лесного низового пожара порциями грунта. Изучить процесс движения почвы в воздушном пространстве, составить имитационную модель движения с характеристикой разлета при различной сплошности потока. Изучить основные рабочие узлы и рабочие органы грунтометательных машин. Провести многофакторные эксперименты, и составить имитационную модель с программой для ЭВМ для проведения имитационных исследований.

1.4. Анализ существующих численных и имитационных методов моделирования взаимодействия рабочих органов землеройных и грунтометательных машин с почвенными средами

Для создания грунтометательных машин необходимо выполнить анализ научных исследований по трем основным направлениям: взаимодействие рабочих органов машины с лесными грунтами, движение грунта в воздушном пространстве, взаимодействие грунта с кромкой лесного пожара (нагретой поверхностью).

К основным пунктам проведения научных исследований по тушению и предупреждению лесных пожаров грунтом следует относить проведение

обзорно-аналитического исследования в направлении остановки лесного низового пожара.

Разработка и создание масштабной грунтометательной машины имеет как положительные, так и отрицательные стороны, накладывающие свои временные и экономические ограничения. Ресурсосбережение – одна из главных задач, стоящих перед обществом. Разработка имитационных моделей позволяет сокращать количество требуемых экспериментов. Разработка моделей в CAD программах позволяет оптимизировать форму создаваемого агрегата, уменьшить энергоёмкость конструкции, повысить точность изготовления. Полученные результаты при помощи программных продуктов обязательно требуют подтверждения в ходе экспериментальных исследований [161].

Моделирование грунта в процессе взаимодействия с рабочими органами машин отнесено к сложным задачам, так как грунт обладает множеством механических свойств с элементами различной геометрической формы. Реальные результаты возможно получить только при рассмотрении почвенного взаимодействия элементов друг с другом, например, рассмотрение индивидуальных частей накладывает ряд допущений, которые искажают реальную картину. В случае, когда дисковому рабочему органу задана угловая скорость $4,2 \text{ с}^{-1}$, происходит улучшение качественных показателей на 16 %, также за счет придания дополнительной энергии снижается тяговое сопротивление на 15 % и повышается скорость обработки с повышением затрачиваемой мощности на 1,43 кВт [113, 115].

Известно, что процесс предупреждения и тушения лесных пожаров требует привлечения значительных трудовых, материальных и финансовых ресурсов. Поэтому разработка научных основ поиска новых и совершенствование существующих средств и способов борьбы с лесными пожарами является важной научной и практической задачей.

Наиболее распространенными видами пожара в лесных массивах считаются низовые пожары. Общеизвестно, лесные насаждения выполняют важную роль в жизни планеты, поэтому и задача, стоящая по защите и

сохранению лесов, является значимой. Исследование и изучение лесных пожаров методами математического и физического моделирования, а в последние годы и создание имитационных моделей стало одним из ключевых этапов при проведении научных исследований.

В работе [90] приведены данные предназначенные для решения поставленных задач методами математического моделирования лесных и степных пожаров.

Следует отметить работу [134], в которой Кузнецов Г.В. представил широкий анализ научных исследований отечественных и иностранных ученых, изучающих лесные пожары и их последствия, подробно представил характеристики, связанные с началом лесных пожаров с указанием происходящих процессов и факторов, непосредственно влияющих на систему.

Представлены данные по высушиванию и горению лесного биотоплива с учетом факторов возникновения лесного пожара. Описаны зарубежные и отечественные методики прогноза лесной пожарной опасности. Рассмотрены вопросы эмиссии и переноса загрязняющих веществ, а также влияние лесных пожаров на биогеоценозы и здоровье населения. Проанализирована проблематика климатических условий, высокопроизводительных вычислений на суперкомпьютерах, разработка геоинформационных систем. Представлены перспективные направления и подходы к форкастингу лесных пожаров [134].

В работе [13] проведены обзорные математические и имитационные исследования, описаны параметры и модельные величины при сдвиге почвенного пласта, а также сила резания рабочими органами орудий и агрегатами, выполненная при помощи DEM моделирования.

По техническим характеристикам отмечено, что исследуемые рабочие органы имели различные геометрические характеристики в частности длину воздействия на почву 153, 280 и 330 мм. Моделирование процесса выполнено в программном комплексе PFC3D. Исследование выполнено с учетом процесса движения почвенной среды в трех направлениях.

В ходе проведенных исследований модельные результаты сдвига грунта обладали высокой сходимостью с полученными данными в реальных экспериментах, например, показания по тяговому сопротивлению имели небольшое различие с данными, полученными в ходе экспериментального исследования и, что важно, с результатами теоретических расчетов, основанных на методе классической механики.

В работе отмечено что тяговое усилие повышалось не по линейной зависимости при изменении размера установки рабочих органов, а вертикальная сила в частных случаях имела противоположное направление (фиксировалась выталкивающая сила). Такие показания возможно трактовать как неверно составленная модель или как открытие новых закономерностей при исследованиях взаимодействия рабочих органов с грунтом.

Часть научной работы представлена в виде анализа «смещения почвенных частиц и образуемого почвенного профиля». Такой подход показывает, что «метод дискретных элементов» может управлять перемещением единичных частиц с учетом действия внешних сил, а также моделировать большие перемещения частиц. Таким образом, применение метода DEM является перспективным направлением в ходе моделирования рабочих органов почвообрабатывающих машин, взаимодействующих с почвенными средами. К отслеживаемым явлениям можно отнести не соответствие в показаниях по смещению грунта в имитационной модели с данными полученными в процессе полевых исследований. Анализируя полученные показания, можно сделать ссылку на то, что в имитационной модели неверно заданы параметры «вязкого демпфирования». Входящие в научные исследования числовые значения коэффициентов демпфирования возможно рассеивали большое количество энергии и контактов частиц, что успокаивало передвижение частиц и вело к снижению уровня смещения. Еще одной причиной могло послужить неверно выбранная модель или ошибочно выставленные характеристики.

В научном исследовании [63, 64] представлены эмпирические данные, полученные в процессе почвообработки, для анализа взяты теоретические исследования [19] методом FEM, и проверены DEM методом в программе EDEM, а также показаны результаты сравнительного анализа. В процессе проведения научных исследований использована «контактная модель линейной когезии с интегрированной гистерезисной пружиной» [63, 64]. В исследовании очень точно создана модель «объемной плотности грунта» за счет распределения частиц.

Стоит отметить, что распространение трещины отчетливо видно на полученных изображениях в лабораторных экспериментах, но они отсутствовали в имитационном моделировании методом DEM. Это возможно из-за того, что размер частиц грунта в имитационных исследованиях большего диаметра, чем частички грунта в почвенном канале, и даже если трещина возникала, она была очень мала для отслеживания.

В научном исследовании [49] представлены данные, полученные в процессе имитационного моделирования «двугранного клина» и «лемешно-отвальной поверхности плуга» с грунтом. Исследование выполнено в LS-DYNA. Полученные в процессе научных исследований модели взаимодействия «двугранного клина» и «лемешно-отвальной поверхности плуга» с грунтом позволяют получать данные процесса почвообработки и могут применяться для получения зависимостей «распределения напряжений» и «деформаций», ко всем достоинствам следует отметить упущение, связанное с отсутствием показаний по тяговому сопротивлению.

В работе [9] показаны результаты применения FEM метода при взаимодействии плужного корпуса с грунтом, который представлен как «эластопластическая модель».

Разработка выполнена при помощи программы Solid Works и перенесена в Abaqus, в роли «дискретного твёрдого тела» с местом опоры на конце отвала. В этой точке рассчитывали силу реакции с ее тремя ортогональными компонентами. В процессе выполнения научного исследования изменяли угол

резания (угол между горизонтальной образующей и направлением обработки почвы) и угол подъема (угол между поверхностью отвала и горизонтальной линией в ортогональном сечении к режущей кромке) на силу тяги.

Как следствие по результатам симуляции найдены 3 составляющие тягового сопротивления, в исследовании уточнено, что данные хорошо согласуются, но следует отметить, что представленные графики не в полной мере соответствуют показаниям полевых исследований.

В научной работе [4] применена методика CFD в программном пакете ANSYS CFX, такой подход позволил исследователям провести виртуальный эксперимент процесса работы рабочих граней культиватора и почвенных элементов. Исследование выполнено с целью сравнительного анализа с данными, полученными в полевых исследованиях. Исследуемыми параметрами были выбраны показания давления и габаритные параметры исследуемой стрелчатой лапы. К дополнительным параметрам в исследовании отнесены тяговое сопротивление и вертикальная сила. Процесс моделирования параметров грунта выполнен методом подбора. Таким образом получены данные, согласующиеся с показаниями экспериментальных исследований. Параметры реального грунта не поддаются точной имитации при помощи «пластической почвы Бингхэма».

Процесс имитации работы стрелчатой лапы позволил получить данные, когда рабочий орган подвергался повышенным нагрузкам. При увеличении количества виртуальных симуляций снижалось количество погрешностей. Предполагаемые показания данных вертикальных сил имели равные ошибочные значения. Имитационные исследования ошибочно выдавали результат с более высокой вертикальной силой в серии экспериментов.

В работе [62] представлены результаты имитационных исследований, выполненные методом CFD, рабочих плоскостей культиватора с грунтом в программном пакете FLUENT 6.3. В ходе исследования было определено, что поведение грунта схоже с вязко-пластичным материалом Бингхэма.

Имитационное исследование выполнено для 3 типов рабочих органов,

различающихся только углами между режущими кромками. Выявлены зависимости рабочего давления по рабочей плоскости стрельчатой лапы и кинематических параметров в пространстве с характеристиками почвы. В ходе компьютерного эксперимента было получено максимальное давление на поверхностях режущих элементов. В качестве рассматриваемых параметров присутствовало тяговое сопротивление, но полученные показания разнились с данными, полученными опытным путем. Осталась нерешенной задача, относящаяся к составляющему вектору тягового сопротивления.

1.5. Анализ конструкций и рабочих процессов лесохозяйственных машин для предупреждения и тушения лесных пожаров

Перемещение кромки лесного низового пожара происходит по нижней части лесного массива, именно там скоплено большое количество органического биотоплива в виде крупных и мелких веток, сухой травы, листьев и хвойных игл. Леса с высоким процентным соотношением хвойных пород отнесены к зонам повышенного риска возникновения и активного развития лесного пожара [128, 132, 141, 147-149, 241, 242].

Одной из мер защиты лесного массива от полного выгорания обозначено разделение общей площади на отдельные сектора, для не позволения масштабного распространения лесного пожара. Разделение выполняется при помощи создания минерализованных полос, которые создают искусственную преграду на пути движения кромки лесного пожара. Защитные полосы позволяют затормозить движение кромки и предоставляют время для эффективного реагирования пожарной бригаде внутри одного участка.

Минерализованная полоса представляет собой расчищенный от биотоплива участок земной поверхности, реализованная методами механизации или ручным трудом [222].

В Российской Федерации на уровне законодательства определены свод правил и требований, предъявляемых к противопожарному устройству лесных

массивов [219]. На основании ГОСТа Р 57972-2017, составленного для основных объектов противопожарного обустройства лесных массивов (дороги, площади посадки, искусственные и естественные противопожарные барьеры и т.д.) [101]. К основным способам предупреждения и ликвидации лесных пожаров на основании нормативной базы относятся минерализованные полосы и разрывы [138].

Искусственная преграда, защищающая от лесного пожара с учетом слабого ветра, должна быть равна, по данным Н.П. Курбатского, минимум двукратной высоте движущейся кромки лесного пожара [136].

Геометрические параметры минерализованных полос соответствуют назначению преграды от 0,3 м (для выполнения отжига). Увеличение параметров ширины полосы повышает шансы на успешную остановку движущейся кромки лесного пожара, например, более 4-х метров [108].

Создание противопожарных разрывов при малых очагах лесного пожара выполняется при помощи ручного инструмента, но при больших объемах применяются механизированные способы создания, например, плуг-канавокопатель ПКЛН-500А (глубина обработки до 0,5 м) или ЛКН-600 (глубина обработки до 0,7 м), а если требуется большая глубина, применяют экскаваторы [72, 91, 132].

Создание минерализованных полос предусматривается при проведении работ по лесовосстановлению, также обязательно создание вокруг построек в лесу и вокруг наиболее важных лиственных и хвойных пород древесины [120, 176, 210, 225-227].

Размер создаваемой минерализованной полосы механизированным методом при помощи почвообрабатывающих орудий ограничен величиной применяемого орудия, такое ограничение в условиях лесного массива нередко становится критичным в ходе движения кромки лесного пожара.

Разработка дисковых орудий проводилась учеными из различных научных областей и направлений научно-технического прогресса. В частности, научные исследования, выполненные д.т.н. Г.Н. Синеоковым, имели цель

установления зависимости конструкции агрегата и основных параметров дисковых рабочих органов, данные тягового сопротивления и силовых показателей работы дискового агрегата, функционирующих на ровной поверхности земли [203]. Научные изыскания, связанные с работой дисковых рабочих органов в лесном хозяйстве, проводились А.И. Барановым, П.С. Нартовым и В.И. Вершининым [74, 75, 93, 153]. Проведенная научная работа опиралась на исследование лесных дисков и сил, действующие на них.

В связи с этим для сферических дисков было проведено динамометрирование. При проведении научных исследований были применены дисковые рабочие органы с $D=770$ мм, с $R_{кр}=700$ мм, регулируемые в пределах различных углов атаки и наклона от вертикальной оси. Местом проведения были лабораторные условия при наличии почвенного канала, которые были наполнены легкосуглинистым грунтом. Движение исследуемого дискового рабочего органа производилось с постоянной скоростью 4 км/ч, при твердости 11...12 кг/см², на глубине обработки 18 см, с влажностью от 7 до 8 %. Научное исследование направлено на пласты почвы вдоль борозды [203].

По полученным при динамометрировании 6 компонентам реактивных сил рассчитывались силы R_x , R_y , R_z , которые представляли собой приложенные к поверхности сферического диска проекции на оси координат главного вектора.

Параметры R_x отмечены как рабочая направляющая, а R_y характеризует «поперечную устойчивость», а показатели R_z имеют направление вверх и отнесены к вертикальной нагрузке машины. Кинематические и геометрические параметры дисковых рабочих органов относительно грунта изменяют показатель площади соприкосновения и сечения. Проводя анализ данных показателей R_x , R_y , R_z , можно сделать выводы о разнице энергопотребления при торможении и движении дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Выполнен ряд научных исследований по нахождению высокоэффективных параметров дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Для исследования отобраны дисковые рабочие органы с радиусом кривизны 700, 900, 1000, 1200 мм и диаметром 650, 770, и

900 мм. В процессе экспериментальных исследований выбрана глубина обработки от 16 до 20 см, с углом атаки дисков 30° до 50° , и углом наклона от 0° до 25° [74,75, 179].

В работах Нартова П.С. получены показатели улучшения «оборачиваемого пласта» грунта в процессе почвообработки дисковыми рабочими органами с заторможенным диском, с потерей процесса перекачивания через препятствия. При этом заторможенный диск мог наползать на препятствия благодаря тупому углу врезания в почву и тем самым преодолевал погребенные в почве толстые корни. По заторможенному диску улучшается сохранность пласта при обороте из-за того, что не происходит значительного подъема пласта почвы. Разработанный П.С. Нартовым лесной диск включил в себя две характеристики от заторможенного, и от свободно вращающегося. К основным недостаткам разработанного диска следует отнести тот факт, что в промежуток между режущей кромкой и неподвижной частью возможны попадания растительности [152, 153].

Научные изыскания, касающиеся работы сферических дисков на склонах до 12° , выполнены И.М. Бартеневым и С.В. Дорохиным. По полученным данным были сделаны выводы, что для стабилизации орудий дисковых батарей на склонах до 12° целесообразно дооснастить дополнительно колесами с ребрами для повышения устойчивости. Разработка новой конструкции дискового агрегата опиралась на данные, полученные при проведении теоретических и полевых экспериментов, агрегат оборудовали дополнительной серией дисков, которые устанавливали на удалении $l=155$ мм и диаметром $D = 410$ мм. В процессе проведения научного исследования были найдены координаты нахождения частиц грунта. Получены теоретические подтверждения в виде программ, алгоритмов расчетов, которые позволили найти данные перемещения частиц грунта [80, 189].

Исследованиями обработки почвы на вырубках дисковыми боронами занимались И.М. Бартенев и П.Э. Гончаров. Благодаря проделанным

теоретическим исследованиям удалось определить составляющие силы резания, которая требуется для перерезания древесины сферическим диском.

В процессе научного исследования выполнены лабораторные работы в почвенном канале ВГЛТУ, в качестве исследуемого образца была взята часть борона БДК-2,5. Полученные данные позволили сделать выводы о недостаточном заглублении секции борона в почву и повышенном тяговом сопротивлении в по отношению к цельнокрайним дисковым секциями.

Данные, полученные в экспериментальных исследованиях, позволили сделать вывод, что от типа дисковых рабочих органов зависит качество обработки почвы. Например, с дисковыми рабочими органами, имеющими вырезы при заглублении до 8 см секция показывает результаты с низким качеством по удалению древесно-кустарниковой поросли, это обусловлено тем, что порубочные остатки и сорняковая растительность забивают рабочий орган. В ходе работы удалось выяснить, что цельнокрайние диски лучше работают в условиях высокой кустарниковой растительности, высокой твердости грунта на вырубках и с сильно задернелыми почвами. Для дробления уже нарезанных пластов почвы вырезные диски устанавливаются на малые углы атаки α .

Повышение эффективности работы дискового орудия возможно за счет изменения параметров. Рекомендуемыми можно считать радиус диска плуга более 330 мм, а расстояние от точки вырезания почвенного пласта до дна борозды, равное $a \leq D/4$, максимально установленный угол атаки диска должен соответствовать условию $\alpha = \Psi \dots \Psi - i'$, а угол вертикальной установки диска $\beta = 0^\circ$ [82, 99].

Лесохозяйственная техника активно применяется для выполнения работ при почвообработке в процессе искусственного и естественного лесовосстановления, например, на песчаных и супесчаных почвах, а также на площадях с количеством пней на 1 га до 600 шт. активно используется плуг ПД-0,7, еще одним направлением для использования считается проведение противопожарных работ [178, 215].

Почвообрабатывающий плуг ПД-0,7 применяется с МТА 14 кН, например, МТЗ-80/82, МТЗ-50/52. Производительность составляет 3,6...5,0 км/ч, при диаметре дисков 660 мм, и ширине создаваемой минерализованной полосы 1,2 м, на глубину обработки почвы 12...24 см, а рабочая скорость 3,6...5,6 км/ч [83, 223, 243].

Проведение работ дисковым орудием возможно только на заданную глубину, так как внесение корректировки в глубину в значительной мере ухудшает качество и эффективность работы дискового плуга. Также одним из немаловажных недостатков данного дискового плуга на нераскорчёванных вырубках является попадание порубочных остатков между грудью крыла отвала и диском, что приводит к заклиниванию диска, увеличению энергозатрат и ухудшению качественных показателей обработки почвы.

Зимариным С.В. разработана конструкция дискового корпуса плуга, позволяющая устранить данные недостатки, которая включает в себя стойку, ступицу на подшипниках и оси, и установленный сферический диск [131].

Сферический диск выполнен в виде крыла и отвала, важным условием является то, что рабочий орган заторможен. При поступательном движении агрегата заторможенный диск разрезает почвенный пласт. Почвенный пласт плавно поднимается сначала по сферическому диску, а затем по отвалу. При этом пласт оборачивается полностью, что способствует качественной укладке его и сохранению целостности сплошной ленты. В процессе работы при встрече дискового рабочего органа с препятствием появляется момент на оси вращения, который превышает требуемую силу сжатия пружины. Чтобы вывести из зацепления дисковый рабочий орган, необходимо снять напряжения на пружине. Направляющей для ролика является плоскость дискового рабочего органа, и диск начинает свободно вращаться на подшипниках в ступице стойки вместе с осью, тем самым преодолевая препятствие, встретившееся на пути, перекатываясь через него. После преодоления препятствия перекатыванием сферический диск притормаживается фиксатором. Но и такая конструкция обладает недостатками, одним из них является то, что сферический диск с

жестко закрепленным к нему отвалом при преодолении препятствия задевает отвалом за гребень борозды.

Драпалюк М.В. и Коротких В.Н. проводили научные исследования по повышению эффективности работы дисковых рабочих органов. В процессе исследования были определены характеристики, которые оказывают наибольшее влияние на качество обработки почвы, к конструктивно-технологическим параметрам были отнесены: диаметр дискового рабочего органа, параметр кривизны сферического диска, угол атаки и угол наклона к вертикали. В процессе научного изыскания получен один из выводов, что при увеличении параметра установки угла атаки дисков повышается насыщенность крошения почвы. Исследователи выполнили проверку активных рабочих органов, в том числе оснащенных дополнительным отвалом [111, 113].

Была предложена новая конструкция лесного дискового плуга с комбинированными рабочими органами. Проведенные научные исследования представляют, что дисковый рабочий орган имеет активный привод в виде гидромотора. Теоретическая часть исследования основывается на том что вырезанный и поднятый фрагмент почвы движется по поверхности дискового рабочего органа и перемещается в борозду сплошной лентой.

Анализ процессов лемешных и дисковых орудий показал, что дисковые орудия обладают преимуществами по сравнению с лемешными по проходимости, рыхлению и образованию валов грунта для подачи фрезерными рабочими органами в требуемом направлении.

Почвообрабатывающие орудия с активно вращающимися рабочими органами позволяют увеличивать диапазон ширины создаваемой минерализованной полосы, без увеличения размеров самого орудия. К основным минусам применения фрезерно-метательной техники следует отнести высокую энергозатратность, и в некоторых случаях недостаточную глубину создаваемой канавы, и важно следить за толщиной и шириной отсыпаемой минерализованной полосы и т.д.

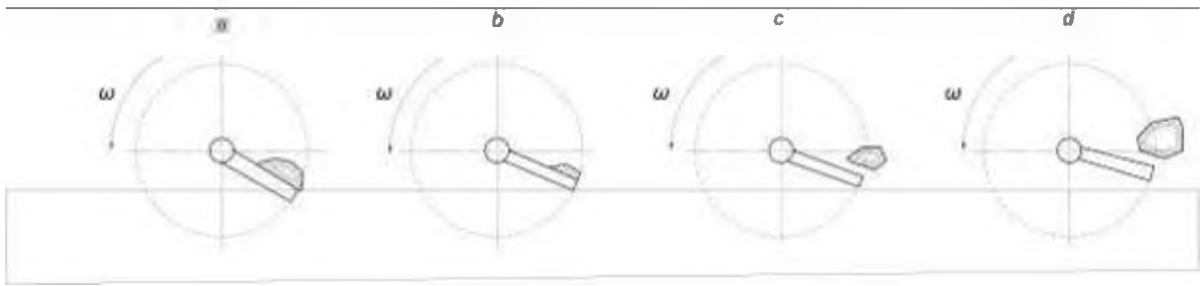


Рисунок 1.1 – Схема поэтапного формирования порции грунта

Таким образом, следует рассматривать машины и орудия с активными рабочими органами (фрезы, роторы, фрезерно-метательные рабочие органы), используемыми в процессе проведения противопожарных работ и для активной борьбы с лесным огнем [11, 14, 115, 126, 127, 155].

В формате активных рабочих органов следует принимать во внимание Российскую и Советскую лесохозяйственную технику (ФЛУ-0,8, ФЛШ-1,2), полосопрокладыватели ПФ-1, грунтометы АЛФ-10, ГТ-3, АЛП-15 [76, 77, 79, 80-85, 155, 157, 158, 180, 182, 201, 202, 206].

Обоснованием рабочих процессов лесной почвообрабатывающей фрезы ФЛУ-0,8 с гидроприводом занимались П.С. Нартов, П.И. Попиков. Лесная фреза с гидроприводом исследовалась на вырубках для полосной обработки почвы и прокладки минерализованных полос. Выявлено снижение динамических нагрузок в 1,3-1,4 раза и надежная защита рабочих органов от поломок за счет четкого срабатывания гидравлических и фрезерных предохранителей. Кроме того, исследованы рабочие процессы полосопрокладывателя ПФ-1 с гидроприводом в агрегате с лесохозяйственным трактором Т-80 Л [155, 157, 158].

В работах Карнаухова А.И. и Орловского С.Н. представлен теоретический анализ резания фрезерными рабочими органами лесных почв с подстилкой, определены оптимальные по критерию с минимальной энергоёмкостью режимов резания, конструктивные и геометрические параметры рабочих органов.

Верхние слои лесной почвы имеют волокнистую структуру. Существующую на сегодняшний день теорию расчета резания грунтов возможно заменить на более точные математические зависимости с включением в теорию описания законов упругости и пластичности почвенной среды при взаимодействии с рабочими плоскостями машины [164, 165, 166].

В России запатентовано навесное землеройное орудие. Основным назначением которого является создание противопожарных минерализованных полос в лесном хвойном или лиственном массиве для предупреждения и тушения лесного пожара. В процессе работы трактор с навешенным на задней навеске землеройным орудием движется по заданной траектории, а качество создаваемой минерализованной полосы достигается за счёт подрезания оставленной прослойки между рабочими органами за один проход. Объем грунта, взятый из промежуточной прослойки, перемещается на боковую кромку борозды и смешивается с отсыпаемым слоем. Выемка перемычки осуществляется подрезающей частью, установленной совместно с чашеобразными отвалами.

Следует отметить, что подрезающая часть конструкции разделена вдоль оси агрегата, а чашеобразные отвалы закреплены за активными рабочими органами и повернуты к ним вогнутой частью поверхности. К достоинствам данной конструкции относится полное очищение от горючих материалов по ширине работы рабочих органов. К недостаткам данного устройства следует отнести технологический процесс, который выполняет агрегат прокладывая и подновляя минерализованные полосы, без применения активного тушения кромки пожара. Также следует отметить, что минерализованная полоса состоит только из фрезерованного участка лесной почвы. Грунт по обе стороны частично состоит из горючих материалов, отсыпанных агрегатом, состоящих из лесной подстилки, травы, сухих веток и др., что значительно снижает эффективность применения агрегата в густо насаженных лесных массивах, сильно задернелых участках почвы и при локализации уже возникшего пожара [86, 87, 136, 235, 236].

В России запатентована грунтометательная машина, предназначенная для тушения лесных наземных пожаров потоком грунта [86]. В конструкцию грунтометательной машины установлен механизм автоматического поддержания режима метания грунта в заданном направлении. МТА в агрегате с грунтометательной машиной продвигается в продольном направлении относительно края лесного низового огня. Приведение в действие рабочих органов грунтомета осуществляется ВОМом МТА, установленным в конструкции агрегата, а вариатор поддерживает постоянный показатель частоты вращения грунтометающей фрезы. Достоинство агрегата заключается в поддержании с помощью вариатора частоты вращения рабочего органа. Основной недостаток грунтометательной машины заключается в недостаточно плотном потоке грунта для прекращения лесного пожара. Грунт подаётся фрезерными рабочими органами комками. Поток подаваемого грунта рассеивается в нескольких плоскостях. Указанные недостатки влияют на эффективность применения данной конструкции грунтометательной машины в процессе предупреждения и ликвидации лесных низовых пожаров в условиях лесного массива.

В России запатентована грунтометательная машина для тушения наземных пожаров [87]. Грунтометательная машина предназначена для тушения уже возникшего пожара потоком грунта в сторону кромки лесного низового пожара. Применяется грунтометательная машина в сцепке с тракторами класса тяги три. Обязательным условием для работы является наличие установленного на задней части трактора вала отбора мощности и задней гидравлической навески.

Достоинством машины является механизм метания грунта, который выполнен с симметричными по конструкции лопатками, закреплёнными с помощью шарниров на ступице. К недостаткам данной конструкции относят формирование рассеянного потока, подаваемого грунта, которого недостаточно для тушения кромки лесного низового пожара, а также отсутствие продуманного механизма съёма верхнего слоя лесной почвы. Работа агрегата допустима на песчаных и супесчаных грунтах при отсутствии корней, камней и порубочных остатков.

В России запатентована грунтометательная машина, конструктивной особенностью которой является регулировка направления подаваемого потока порций грунта во взаимно перпендикулярных плоскостях [1]. Основное назначение грунтометательной машины состоит в создании и обновлении минерализованных полос для обеспечения противопожарной безопасности в лесном массиве.

Грунтометательная машина относится к орудиям, работающим в сцепке с тракторами на колёсной и гусеничной базе. Грунтометательная машина навешивается на гидравлическую систему МТА. Движение выполняется на безопасном расстоянии от кромки лесного пожара, но достаточном для работы машины. Прокладка минерализованной полосы выполняется при помощи вращения поворотного центробежного вентилятора.

Разработанная грунтометательная машина показывает высокую эффективность на лесных площадях, где лесной грунт имеет рыхлый состав, очищенный от большого скопления каменистых, комкообразных включений. Чтобы исключить частые остановки для выполнения очистки системы поднятия грунта от забивания верхним слоем дёрна и корневой системой, рекомендуется предварительная обработка несколькими орудиями. Технология работы основана на подъёме грунта над плоскостью земли на некоторое расстояние и придание механического импульса для метания активным рабочим органом, выполненным в виде вентилятора с установленными на нем лопастями. Процесс метания грунта осуществляется в разных направлениях от движения агрегата.

Достоинством конструкции являются подъем грунта и загрузка в камеру, что позволяет постоянно поддерживать поток при неровностях рельефа. К недостаткам агрегата относятся поднятие грунта в нескольких плоскостях, что приводит к частым остановкам для освобождения механизма от каменистых включений, порубочных остатков, плотных комьев дернины из верхнего слоя лесной почвы, слабо фокусированный поток подаваемого грунта и невысокая дальность метания.

В России запатентован фронтальный лесопожарный грунтомет, предназначенный для прокладки защитных минерализованных полос, а также тушения низовых пожаров грунтом. Грунтометательная машина навешивается на базовую МТА и обеспечивает равномерное метание грунта по создаваемой минерализованной полосе. На диске фрезы закреплены ножи-метатели, созданные в виде спиральной формы. К плюсам машины следует относить монтаж на оси качания, что даёт возможность преодолевать препятствия в лесном массиве. К недостаткам относятся недостаточная ширина создаваемой минерализованной полосы, малый и рассеянный поток подаваемого грунта, которого недостаточно для прекращения распространения лесного пожара [147].

Создана лесопожарная грунтометательная машина для выполнения работ по предупреждению и тушению лесного пожара. Как и большинство технических средств, работает только с МТА, в процессе движения которого происходит заглубление рабочего органа (кожуха-рыхлителя) и последующее метание порций грунта в сторону кромки лесного низового пожара. Лесная среда насыщена не только крупными деревьями на пути движения МТА в агрегате с лесопожарной техникой, часто встречаются мелкий подрост, который легко перерезается при помощи ножей, установленных на кожухе лесопожарного грунтомета. Рабочий орган приводится в действие гидравликой, установленной на базовом МТА. В качестве направляющего механизма в кожухе предусмотрены вырезанные в стенках окна. К регулировочным параметрам относится величина заглубления кожуха рыхлителя в грунт и изменение угла открывания пластин на кожухе, что позволяет изменять дальность метания грунта [171].

Достоинствами агрегата являются использование не механического, а гидравлического привода рабочего органа. Грунтометательная машина работает при заглублении кожуха в процессе поступательного движения в грунт, что позволяет поддерживать постоянный объем почвы на неровности рельефа местности, а также способность конструкции режущих ножей кожуха перерезать мелкий кустарник. К недостаткам относится слабо

сфокусированный поток грунта, который рассеивается по всей траектории. В процессе метания грунта на кромку или очаг лесного пожара поступает горючий материал, из-за того, что грунт подбирается машиной именно из верхнего слоя лесной почвы. Также необходимо учитывать высокое сопротивление при резании кожухом верхнего слоя лесной почвы.

В Российской Федерации запатентован лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель. Машина обеспечивает повышение результативности работы за счёт сдвигания биологического топлива в сторону от прямолинейного движения МТА и предоставления допуска к минерализованному слою, при помощи двухстороннего шнека. При оснащении машины шнеком исключается выброс лесной подстилки в сторону движущегося пожара. Выполнение ротора-метателя поворотным позволяет концентрировать грунт, направлять его уплотнённым потоком в сторону пожара и укладывать в виде ленты шириной до 2 м и толщиной до 0,05-0,07 м [6].

К зарубежным грунтометательным машинам можно отнести. В процессе своей работы, согласно патенту, машина изымает грунт, делит на фракции и направляет в сторону кромки лесного пожара. Конструкция устройства включает серию рабочих органов. Например, для придания однородной грунтовой фракции установлены дисковые батареи с активным приводом от гидромотора. Отличительной особенностью лесных грунтов является наличие корней деревьев, а также лесной подстилки, в связи с этим оснащение дисковых рабочих органов зубьями позволяет повысить эффективность агрегата. Далее установлены лемеха, выполняющие функцию подбора. Метание грунта в зону кромки пожара выполняется роторным метателем, установленным в закрытом корпусе, на котором смонтировано большое количество ребер [66].

Порции грунта направляются в открытое окно, созданное в корпусе. Рама машины имеет две секции, которые сцеплены гидроцилиндрами. Такое исполнение позволяет менять заглубление рабочего органа в процессе движения. Машина работает с тракторами на гусеничной базе, основное назначение

машины проведение лесопожарных работ и создание минерализованных полос и/или активного процесса борьбы с лесным пожаром. Основным преимуществом машины является подготовка грунта перед метанием, но конструкция имеет ряд недостатков, например, высокая металлоемкость, повышенная энергоемкость, грунт идет вперемешку с биологическим топливом.

В Европейском Союзе исследована и разработана машина для проведения лесопожарных работ. Процесс работы машины представляет собой сбор грунта в процессе движения МТА и последующее его направление потоком на кромку лесного пожара. К основным конструктивным элементам машины отнести каток и метаящий рабочий орган, который представляет собой турбину. Устройство возможно дооснастить дополнительными рабочими узлами, например, отвалом или дополнительной фрезой для уничтожения деревьев или сорняковой растительности. К достоинствам машины возможно отнести то, что она имеет несколько вариантов компоновки, а к недостаткам – повышенный расход металла на конструкцию, повышенное энергопотребление и метание горючих материалов в зону кромки лесного низового пожара [56].

В США выдан патент на машину, предназначенную для проведения лесопожарных работ. Машина выполнена как навесное устройство, агрегируемое с МТА. Машина служит для выполнения лесопожарных работ на открытых местностях, особенно где отсутствует возможность применять воду. Конструкционно машина состоит из механизма подъема грунта, механизма измельчения грунта и метаящей части через специально смонтированный совместно с вентилятором желоб. Такое исполнение конструкции при помощи вентилятора наполняет узел давлением. Двигаясь в агрегате с МТА, выполняются работы по тушению лесного пожара грунтом. Не считая основных положительных характеристик, такое исполнение машины не лишено ряда недостатков, например, высокое энергопотребление, что ведет к повышению тягового класса трактора. Метание в зону кромки низового пожара, не очищенного от горючих примесей грунта [3].

В 2012 году коллективом учёных ВГЛТУ под руководством профессоров кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Драпалюка М.В. и Бартенева И.М. был разработан и изготовлен комбинированный грунтомет-полосопрокладыватель. Основными задачами были разработка и изготовление комбинированной грунтометательной машины нового поколения, с учетом уменьшения ресурсов на проектирование и эксплуатацию, но в первую очередь предстояло решить задачу повышения эффективности механизированной техники. Созданный лабораторный образец требовался для проведения научных полевых опытов и определения оптимальных параметров машины с учетом предварительной подготовки грунта дисковыми рабочими органами [78, 85, 110, 118, 141, 170, 172].

В 2016 году данные исследования были продолжены в работе Ступникова Д.С. под руководством профессора Драпалюка М.В. Целью проведённой работы являлось повышение эффективности и качества проведения профилактических работ, а также непосредственного тушения лесных пожаров разработанной лесопожарной грунтометательной машиной. При движении разработанный агрегат заглубляется в почву за счёт скобы, которая позволяет разрыхлять и вырезать сегмент верхней части рабочей области. Особенности принципа действия грунтомета в том, что грунт доставляется к фрезе-метателю без его дополнительного принудительного подъёма. Отделение грунта от монолита происходит порциями и направляется в открытое окно в одну из сторон движения агрегата [119, 140, 148, 150, 170, 171, 209-213].

Одной из зарубежных известных серий, выпущенных в сектор реальной экономики, можно назвать образцы грунтометательных машин, выпущенные испанской компанией EXiTT [28].

Название на испанском языке «extincion incendios tierra-tierra», переводится как «агрегат для тушения наземного пожара». Компанией разработаны и созданы несколько образцов грунтометательных машин, способных ликвидировать лесной пожар, применяя для этого грунт.

Грунтометательные машины работают в основном на лёгких песчаных видах грунтов.

В Сибирском государственном университете учеными Федорченко И.С. и Максимовым Е.И. выполнена научная работа с разработкой и изготовлением машины фронтальной лесопожарной грунтометательной. Машина представлена в виде несущей рамы и фрезерного рабочего органа, смонтированного на оси «качания». Смонтирована на оси совместно с направляющим кожухом и рамой машины при помощи шарнира. Изменение угла установки фронтального лесопожарного грунтомета производится при помощи гидроцилиндров. Активный фрезерный рабочий орган представлен в виде лопаток, смонтированных на диске, и приводится в действие при помощи гидромотора. Конструкция машины оснащена активным фрезерным рабочим органом, исполненным с учетом индивидуальных особенностей изобретения, основанных на выполнении рабочего органа с лопатками, которые расположены по спирали на диске. Применение машины в процессе лесопожарных работ повышает эффективность с соблюдением технологии процесса проведения профилактических работ, а также при тушении кромки лесного пожара. Основным недостатком машины является малое заглубление фрезы, работа в неочищенных от гумусового отложения почвах и малая дальность метания [89, 146, 147, 168, 215, 221, 222].

В Саратовском ГАУ им. Н.И. Вавилова разработано и запатентовано устройство пожарного грунтомета фрезерного типа, позволяющее проводить работы, направленные на повышение уровня противопожарного обустройства в лесу и на равнинах [169, 225, 226, 227, 228].

Оснащение грунтомета механизмом предварительного измельчения в виде фрезерного барабана с Г-образными ножами снижает требуемую мощность, подаваемую на фрезы-метатели, и повышает объем метаемого грунта на кромку лесного низового пожара. Результативность тушения лесного пожара возрастает с повышением скорости движения МТА и повышением продвижения в разных природных условиях, при перенасыщении корневой системой деревьев, падежа и древесно-кустарниковой поросли. Особенностью создания минерализованных

полос в части снижения энергозатрат является отключение фрезерных рабочих органов, но при этом сохраняется работоспособность фрезерного барабана с Г-образными ножами. Тушение лесного низового пожара выполняется при полностью активных рабочих органах. Грунт проходит предварительную подготовку, что положительно сказывается на процессе, но при этом повышена металлоёмкость и энергоёмкость, выполняется подача грунта на кромку вперемешку с биотопливом.

1.6. Цель и основные задачи диссертационного исследования

Выполненный анализ состояния проблемы позволил определить следующую цель и задачи диссертационного исследования.

Целью работы является совершенствование грунтометательной техники путем научного обоснования технологического процесса и разработки рабочих органов.

Для достижения поставленной цели были сформированы задачи исследования, основное содержание которых заключается в следующем:

1. Проанализировать состояние проблемы, технологию работы и технико-технологические схемы грунтометательных машин с направленным потоком грунта;
2. Разработать математические модели процесса тушения и взаимодействия основных рабочих органов грунтометательных машин с грунтом;
3. Исследовать технологические процессы тушения пожара, движение в воздушном пространстве грунта и взаимодействие его с рабочими органами машины;
4. Установить закономерности процесса работы базовой грунтометательной машины, обосновать и оптимизировать основные параметры рабочих органов;

5. Установить зависимости влияния движения грунта в воздушном пространстве и геометрических, кинематических характеристик грунтометательных машин на процесс механического и теплового тушения пожара;

6. Определить качественные и технико-экономические показатели работы грунтометательных машин и разработать рекомендации по их рациональному применению.

2. Установление закономерностей влияния физических и геометрических параметров лесного грунта на эффективность пожаротушения

2.1. Подготовка проведения однофакторного лабораторного эксперимента

Необходимость широких научных изысканий по теме диссертационного исследования ставит целью эксперимента выявление скрытых закономерностей, свойств исследуемых объектов, влияющих на протекание процессов, и проверку справедливости ранее выдвинутых гипотез.

Среди различных видов проводимых экспериментов выделяют лабораторный эксперимент, при котором изучение реального образца объекта или его макета реализуется в специальных лабораторных условиях с применением типовых приборов и других устройств.

Современный уровень проведения экспериментальных исследований характеризуется возможностью применения разнообразных контрольно-измерительных приборов, установок, стенов и другого экспериментального оборудования для сбора данных. В результате собирается большой объем данных, который необходимо статистически обработать. Решение данной задачи без применения ЭВМ весьма затруднительно. Обработка результатов экспериментов требует от исследователя навыков и знаний методов теории вероятностей и математической статистики, реализуемых с использованием компьютерных технологий обработки информации.

Выявление характерных скрытых закономерностей исследуемых процессов возможно осуществить с использованием математических методов статистической обработки результатов эксперимента. Статистические методы обработки данных классифицируются на первичные и вторичные.

Первичные – методы, используя которые, получают показатели, непосредственно отражающие результаты экспериментальных измерений (мода, медиана, дисперсия, выборочное среднее и др.) и позволяющие упорядочить вы-

явленные данные об изучаемом объекте или процессе.

К вторичным методам обработки данных относят корреляционный анализ, ковариационный анализ, регрессионный анализ и др.

2.2. Разработка и описание лабораторного стенда

Проведение лабораторных экспериментов выполнено на специальном стенде (рисунок 2.1). Лабораторный стенд представлен в виде замкнутого прямоугольного контура с глубиной 30 см, оснащенный электронным оборудованием в виде термопар с возможностью передачи получаемых данных на ПК.



Рисунок 2.1 – Проведение лабораторных исследований процесса тушения лесного пожара с помощью грунта

2.3. Методика проведения однофакторного лабораторного исследования

В процессе экспериментов в начальный момент времени при помощи горелки производился «поджог» верхнего слоя грунта, в том числе с наличием лесной подстилки. При этом в прямоугольной области экспериментального пространства максимальная температура $T_{п}$ достигала значений от 723,15 К до 873,15 К по отдельным сериям опытов. Данная величина намеренно задаётся выше критической температуры воспламенения лесной почвенно-растительной

среды ($T_k=573,15$ К).

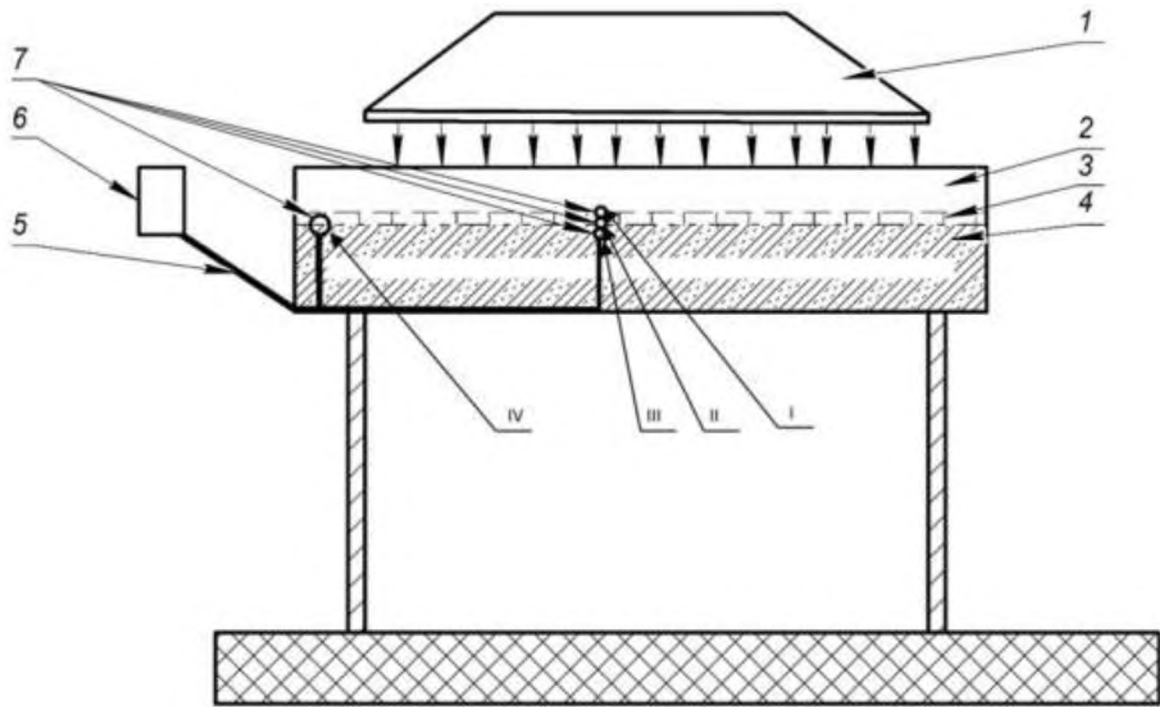
В процессе исследования производились серии «поджогов» лесной подстилки в разном объеме, с учетом различных лесных условий. Таким образом проводилась оценка распространения тепловой энергии в зоне имитационного лесного пожара и тушения при помощи грунта.

Лесной пожар возникает, когда температура биологического топлива выше критической T_k .

Для эффективной визуализации представления процесса лесного низового пожара элемент должен быть окружён «пламенем» с температурой, превышающей 873,15 К. После достижения требуемой температуры зона лесного пожара засыпалась грунтом с влажностью 14 %, толщина засыпки в ходе исследования варьировалась от 0,04 до 0,1 м³, после был выбран наиболее стабильный объем грунта и проведена статистическая обработка результатов. Далее производились наблюдения за процессом с фиксацией данных охлаждения верхних слоёв грунта. Временной интервал проведения одного опыта составлял 30 минут.

В качестве контрольно-измерительных устройств температурных характеристик использовались термопары К типа, работающие в диапазоне температур 0-1073,15 К.

Датчик 1 находился на поверхности нагреваемой площади, датчик 2 – на глубине 10 мм, датчик 3 – на глубине 20 мм от поверхности почвы. Датчик 4 являлся контрольным и располагался на поверхности грунта удалённо от места имитационного лесного пожара (рисунок 2.1).



1 – элемент нагрева; 2 – контролируемое пространство; 3 – лесная подстилка; 4 – наполнение (грунт); 5 – кабель канал; 6 – устройство обработки; 7 - термопары

Рисунок 2.2 - Лабораторный стенд для проведения исследований процесса тушения лесного пожара грунтом

2.4. Проведение однофакторного лабораторного эксперимента

Проведение лабораторных исследований проходило в лаборатории кафедры Механизации лесного хозяйства и проектирования машин «Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова». Помещение специально оборудовано для проведения подобного ряда исследований: установлена вытяжка, пол и стены не содержат легковоспламеняющихся материалов, также в помещении отсутствуют элементы мебели, стенды и т.д., способные воспламениться в ходе проведения исследований.

В процессе лабораторных исследований, показанных на рисунке 2.1, выполнены опыты, состоявшие из двух серий в 10-кратном повторении, показания датчиков позволили получить усредненные значения на выходе.

Полученные в ходе выполнения лабораторного эксперимента данные использовались в дальнейшем для проведения статистической обработки с целью подготовки рекомендаций по использованию результатов проведенных исследований:

- проанализированные показания приборов в процессе распространения тепловой энергии в пластах грунта без лесной подстилки при механическом сбивании и тушении кромки лесного низового пожара грунтом;

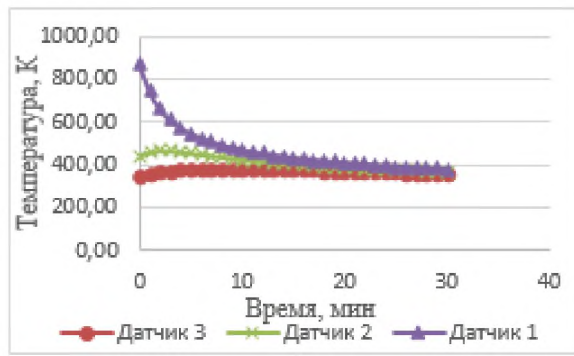
- проанализированные показания распределения тепловой энергии в пластах грунта, насыщенных гумусовыми отложениями, в процессе механического сбивания и тушения кромки лесного низового пожара грунтом.

Первоначально была проведена серия экспериментов для определения требуемого объема грунта для тушения лесного пожара. В ходе серии экспериментов изменяли объем засыпаемого грунта от 0,04 м³ до 0,1 м³. Температура засыпаемого грунта была постоянно 298,15 К и влажность 14 %.

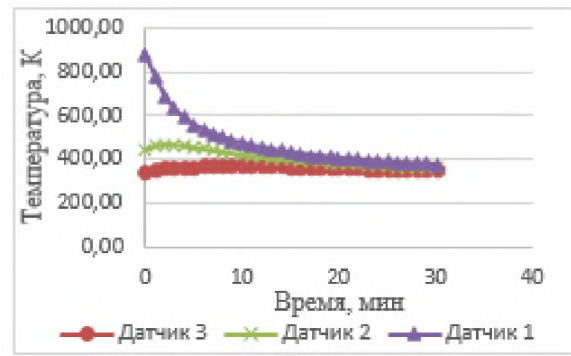
На рисунке 2.3 представлены результаты экспериментов по тушению лесного низового пожара,двигающегося по поверхности земли, очищенной от лесной подстилки. Имитирование нагревания поверхности происходило до температуры 873,15 К. Затем производилось засыпание зоны, подверженной температурному нагреванию, грунтом, температурой 298,15 К и объемом от 0,04 м³ до 0,1 м³.

Далее были составлены усреднённые показания по данным, полученным в результате выполненных экспериментов по матрице, составленной для различных характеристик при тушении лесного пожара порциями грунта, в момент продвижения лесного низового пожара не по лесной подстилке, а по покрову почвы, тем самым нагревая её. Расчетные значения результатов внесены в таблицу 2.1.

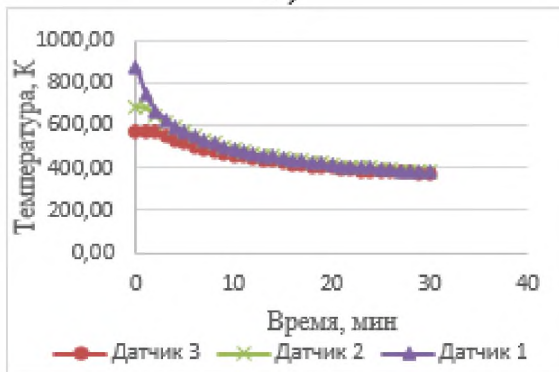
Данные, полученные в ходе однофакторного лабораторного экспериментального исследования для обработки результатов, были занесены в Microsoft Excel и построен график для определения зависимости температуры охлаждения от времени (рисунок 2.4).



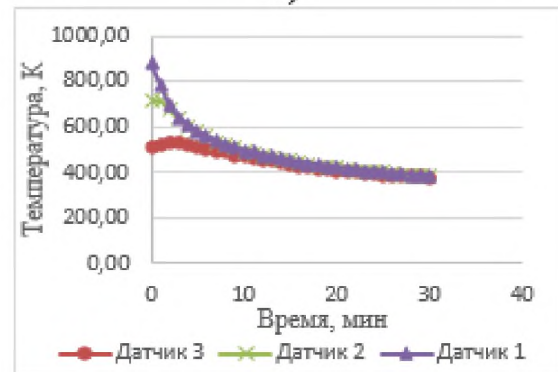
а)



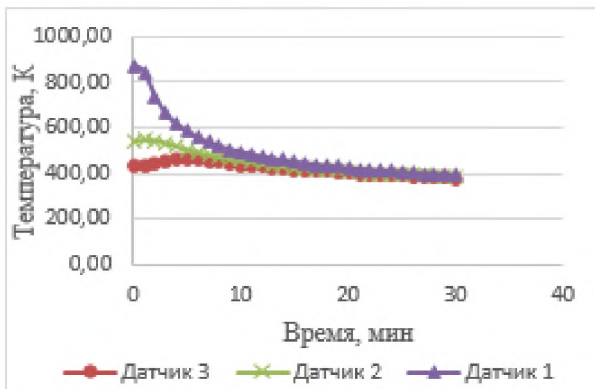
б)



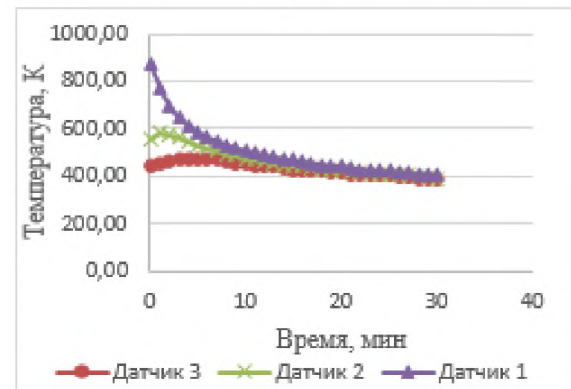
в)



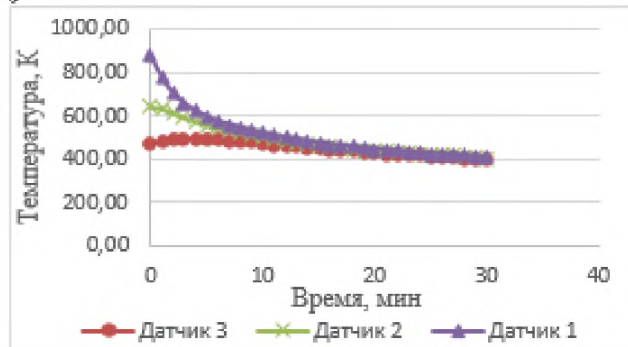
г)



д)



е)



ж)

а - 0,04 м³; б - 0,05 м³; в - 0,06 м³; г - 0,07 м³; ж - 0,1 м³

Рисунок 2.3 – Объем грунта, использованный при тушении лесного пожара, распространяющегося по поверхности без лесной подстилки

Таблица 2.1 - Усреднённые результаты эксперимента по тушению лесного пожара грунтом в случае, если имитационный лесной низовой пожар происходил без лесной подстилки

Объем грунта, м ³	Температура датчика 3, К	Температура датчика 2, К	Температура датчика 1, К
0,04	369,08	408,63	475,09
0,05	360,96	405,33	476,69
0,06	444,80	475,75	485,30
0,07	443,80	482,73	492,88
0,08	418,86	442,41	498,92
0,09	431,43	461,09	506,21
0,1	448,80	483,86	514,12

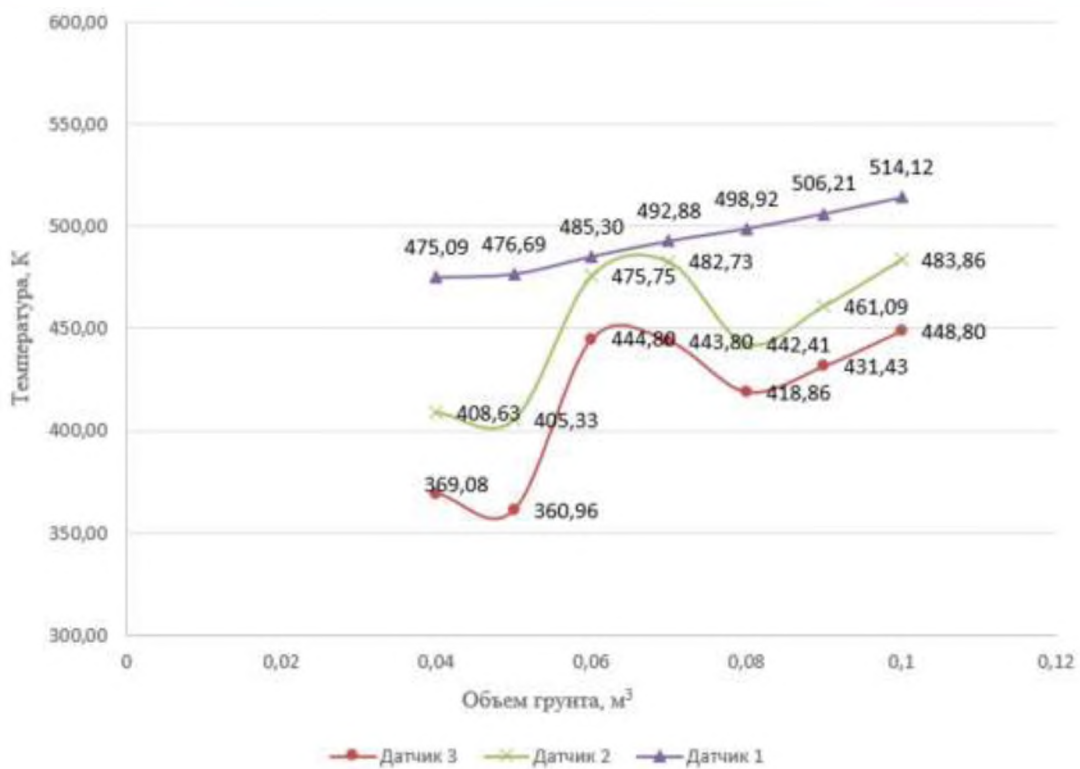
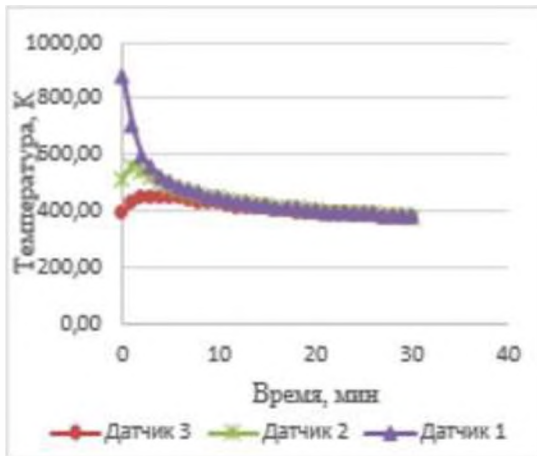
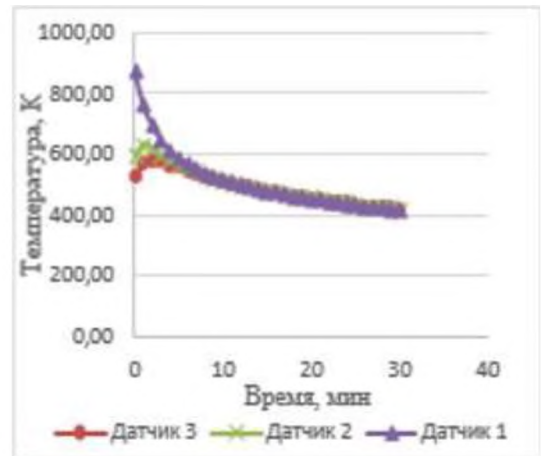


Рисунок 2.4 – Усреднённые результаты эксперимента по тушению лесного пожара грунтом в случае, если лесной низовой пожар происходило без лесной подстилки

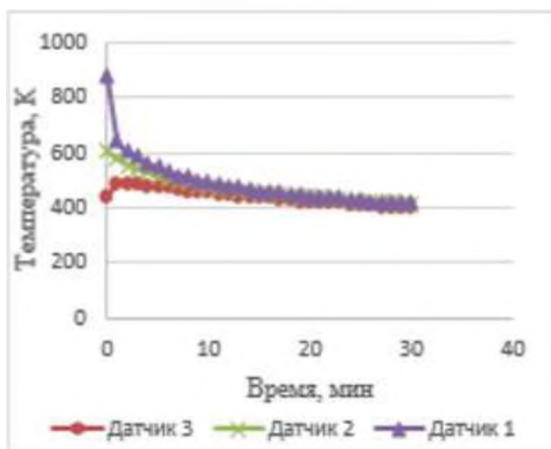
Далее была проведена серия экспериментов, в ходе которой верхний слой грунта был закрыт лесной почвенно-травянистой частью (рисунок 2.5).



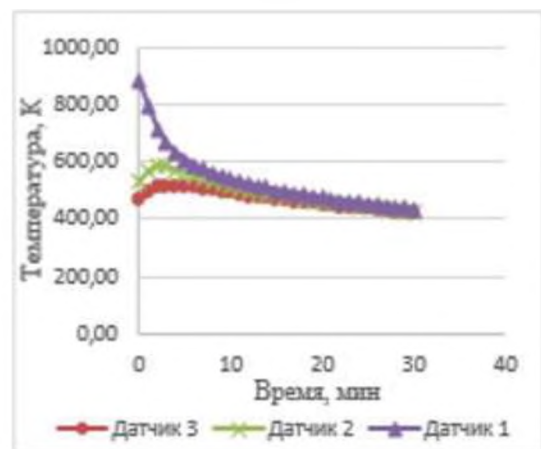
а)



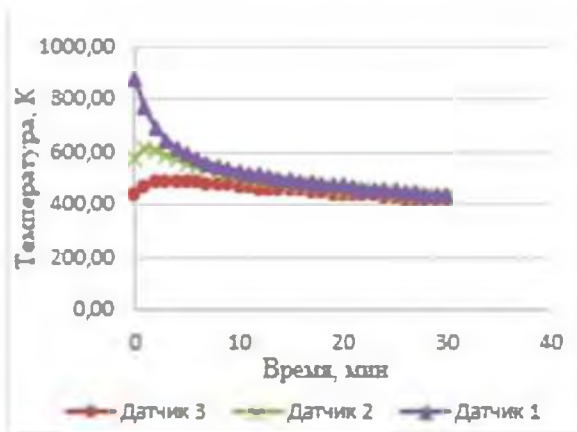
б)



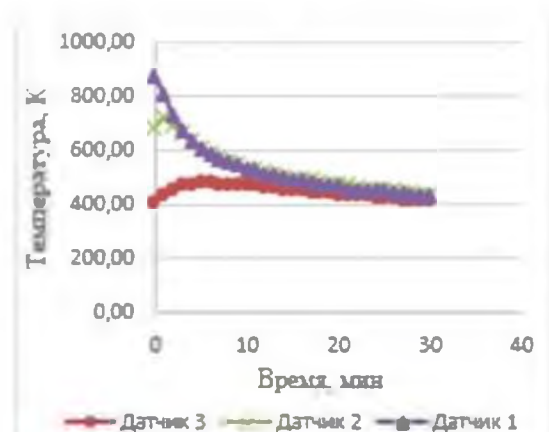
в)



г)



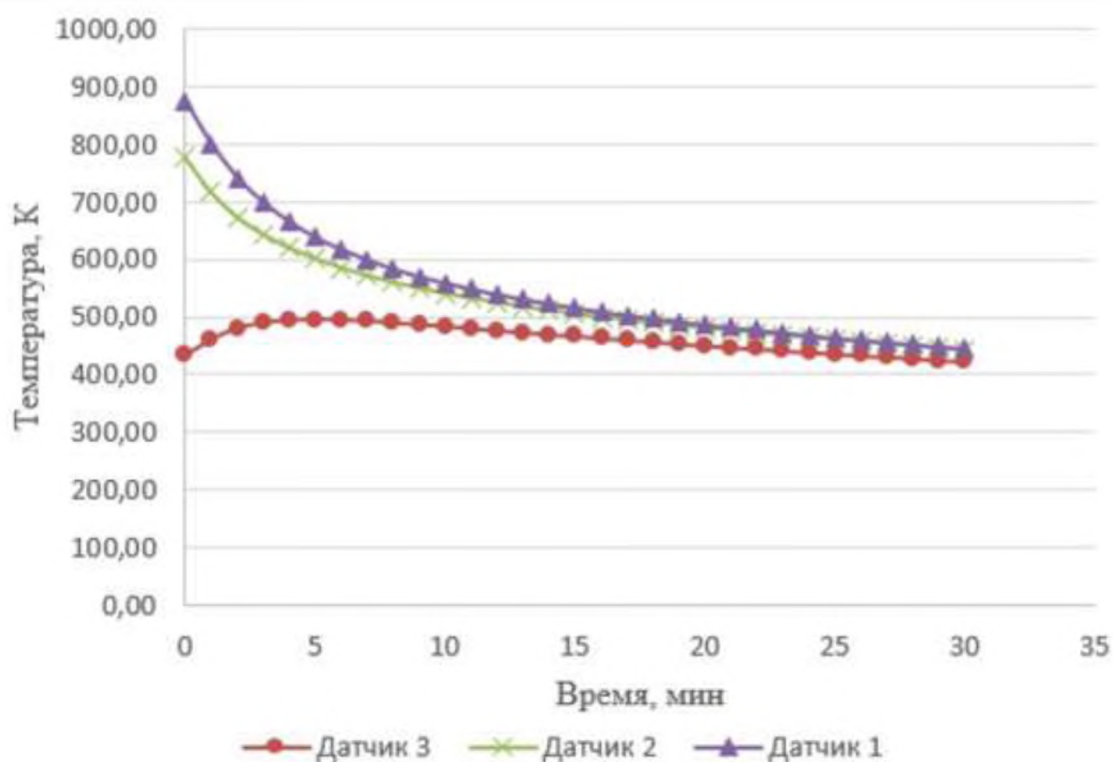
д)



е)

а - $0,04 \text{ м}^3$; б - $0,05 \text{ м}^3$; в - $0,06 \text{ м}^3$; г - $0,07 \text{ м}^3$; д - $0,08 \text{ м}^3$; е - $0,09 \text{ м}^3$

Рисунок 2.5 – Объем грунта, подаваемый в процессе тушения лесного пожара, продвигающегося по лесной подстилке:



ж - 0,1 м³

Рисунок 2.5 (Продолжение) – Объем 0,04 - 0,1 м³ грунта для тушения лесного пожара, продвигающегося по лесной подстилке:

Таблица 2.2 - Усреднённые результаты эксперимента по тушению лесного пожара грунтом в случае, если процесс происходил при наличии лесной подстилки

Объем грунта, м ³	Температура датчика 3, К	Температура датчика 2, К	Температура датчика 1, К
0,04	434,13	408,16	456,31
0,05	468,54	439,95	494,18
0,06	468,54	439,95	513,96
0,07	469,14	451,63	529,84
0,08	497,30	454,89	534,99
0,09	529,15	461,52	537,05
0,1	531,12	485,51	552,44

Результаты, полученные в ходе эксперимента, для наглядности были занесены в Microsoft Excel и построен график для определения зависимости температуры охлаждения поверхности, закрытой лесной подстилкой, подверженной лесному пожару, от времени (рисунок 2.6).

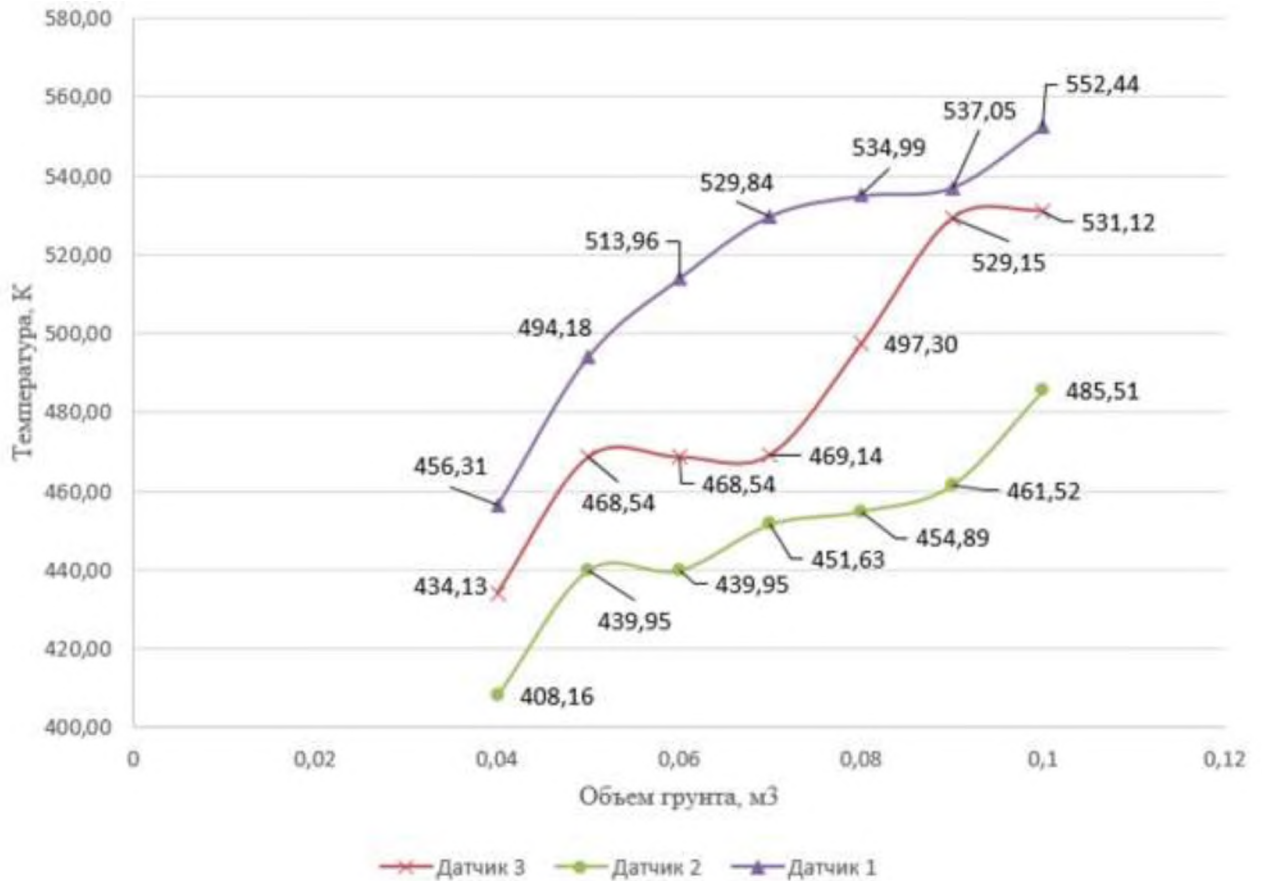


Рисунок 2.6 – Усреднённые результаты тушения лесного пожара грунтом (с лесной подстилкой)

Первоначально были выполнены эксперименты по оценке эффективности охлаждения порцией грунта почвенной среды без лесной подстилки. Усреднённые результаты полученных экспериментальных данных приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Результаты снятия показаний температуры при лесной низом пожаре без лесной подстилки

Время, мин.	Температура, К			
	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
1	2	3	4	5
0	727,4	431,65	327,9	297,4
1	676,15	443,15	333,4	314,4
2	667,9	452,4	339,9	301,9
3	653,65	460,9	345,65	297,15
4	638,15	466,15	351,15	296,4
5	615,4	471,15	354,65	303,4
6	604,15	474,15	357,65	299,9
7	591,4	475,4	360,15	299,15
8	564,4	476,15	362,15	311,9
9	561,15	475,4	363,15	305,4
10	544,15	474,4	364,65	311,9
11	534,15	473,15	365,65	311,9
12	525,4	471,65	367,15	312,9
13	518,4	469,4	369,9	312,15
14	515,65	465,15	373,85	302,9
15	515,15	465,65	373,85	302,9
16	498,65	463,4	375,35	312,9
17	496,85	461,4	376,65	309,9
18	487,65	459,15	377,85	313,65
19	483,35	457,4	378,85	313,4
20	493,15	455,15	380,15	301,15
21	480,85	453,15	380,35	308,65
22	476,35	450,9	381,35	307,9
23	479,15	448,9	381,65	303,4
24	473,15	447,4	382,65	306,4
25	463,85	445,9	382,65	311,65
26	460,15	443,9	382,65	312,9
27	462,85	441,9	383,65	306,4
28	455,85	439,9	383,85	311,65
29	463,35	438,65	383,65	302,9
30	457,65	436,65	383,65	304,4

Результаты экспериментов представлены на рисунке 2.7.

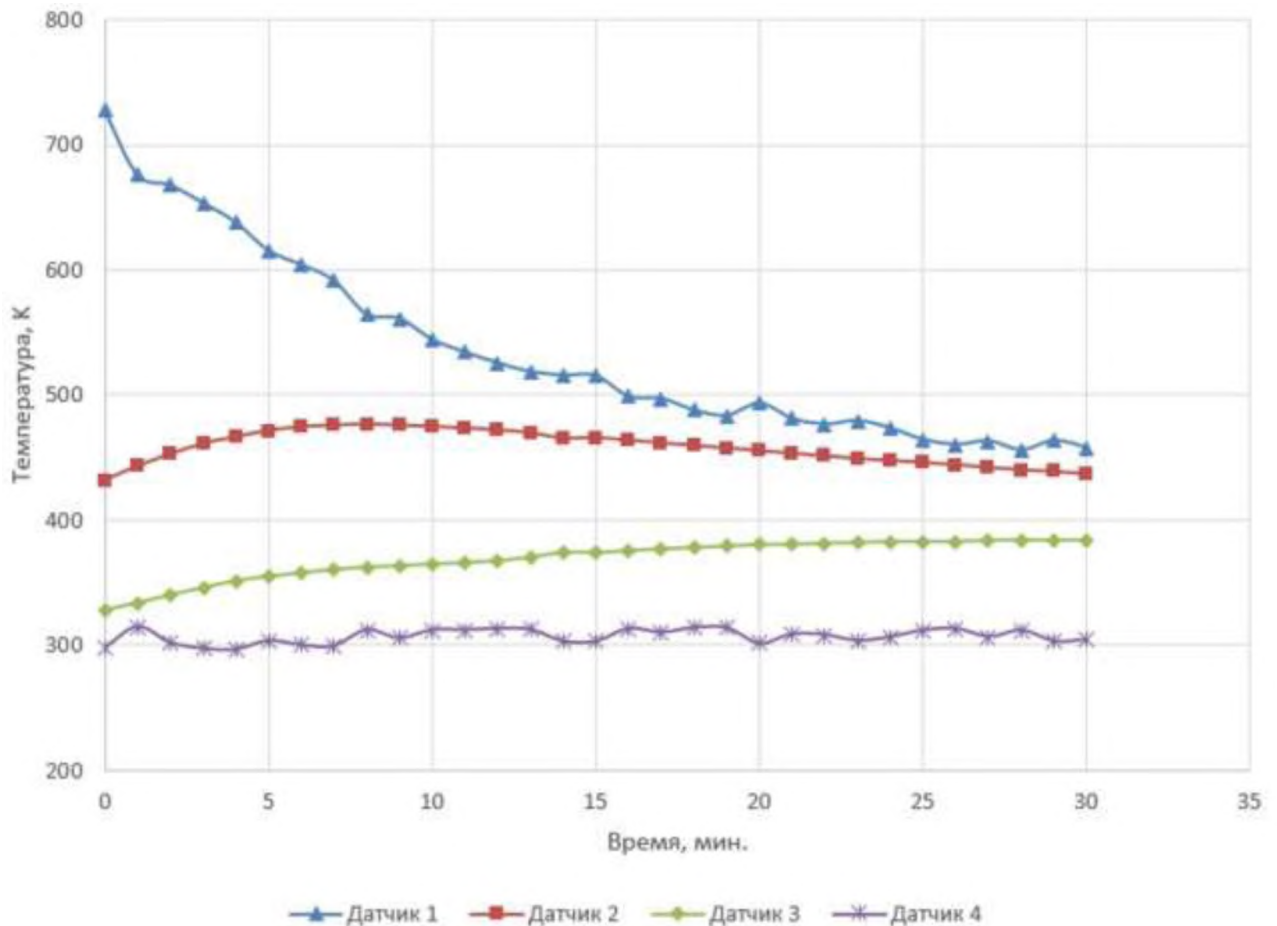


Рисунок 2.7 – Результаты оценки эффективности охлаждения порцией грунта почвенной среды без лесной подстилки

По результатам наблюдений за отчётные 30 минут было выявлено, что остывание верхнего слоя происходит интенсивно, а в нижних слоях температура сначала повышается, а затем также происходит рассеивание тепловой энергии в окружающую среду.

Функция «Описательная статистика» позволяет выполнить статистическую обработку полученных данных в программе Microsoft Excel.

Результаты анализа представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для эксперимента по охлаждению порцией грунта почвенной среды без лесной подстилки

Описательная статистика	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
Среднее	535,01	457,73	368,57	306,73
Стандартная ошибка	13,62	2,4	2,83	1,01
Медиана	515,15	459,15	373,85	306,4
Стандартное отклонение	75,83	13,4	15,81	5,64
Дисперсия выборки	5750,78	179,79	250,01	31,87
Экссесс	0,01	-1,18	0,46	-1,25
Асимметричность	1,01	-0,22	-1,11	-0,29
Интервал	271,55	44,5	55,95	18
Минимум	455,85	431,65	327,9	296,4
Максимум	727,4	476,15	383,85	314,4
Сумма	16585,5	14190	11426	9508,9
Счет	30	30	30	30

Затем был проведён эксперимент по оценке распространения тепловой энергии в слоях грунта с наличием лесной подстилки при засыпке зоны лесного низового пожара порцией грунта. Усреднённые результаты полученных экспериментальных данных приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Результаты снятия показаний температуры в почвенной среде с наличием лесной подстилки

Время, мин.	Температура, К			
	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
1	2	3	4	5
0	722,65	489,15	383,65	300,9
1	719,35	492,65	385,45	300,75
2	714,85	497,65	387,15	300,65
3	705,75	500,55	389,55	302,35
4	693,35	505,85	390,35	303,65
5	675,05	507,35	391,35	310,95

Окончание таблицы 2.5

1	2	3	4	5
6	657,65	512,85	393,65	319,4
7	657,15	516,55	395,25	313,35
8	656,15	518,35	396,85	306,15
9	645,55	520,05	398,05	308,25
10	638,15	521,35	399,65	309,4
11	626,55	523,85	401,55	315,95
12	613,35	524,15	403,15	319,15
13	617,25	524,65	405,25	305,85
14	619,65	525,15	406,65	302,9
15	612,95	525,05	408,85	304,65
16	606,85	524,85	409,35	306,15
17	603,05	524,25	410,55	305,25
18	600,15	523,85	411,85	303,15
19	594,55	524,05	413,05	303,3
20	591,15	524,15	414,35	303,4
21	584,85	523,35	415,75	303,45
22	582,85	522,65	416,65	303,65
23	571,45	521,45	417,95	308,25
24	564,35	520,65	418,35	313,65
25	564,15	519,65	419,45	310,25
26	563,65	518,85	420,65	307,65
27	557,35	517,45	421,85	309,05
28	549,65	516,65	422,35	315,15
29	550,25	516,55	422,65	314,15
30	550,65	516,35	422,85	312,65

Данные, полученные при определении описательной статистики, выполнены при помощи функции «Описательная статистика» в пакете Microsoft Excel.

Результаты анализа представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для эксперимента по охлаждению порцией грунта почвенной среды с наличием лесной подстилки

Описательная статистика	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
Среднее	619,68	516,77	406,25	307,85
Стандартная ошибка	9,59	1,77	2,23	0,97
Медиана	612,95	520,05	408,85	306,15
Стандартное отклонение	53,43	9,9	12,46	5,4
Дисперсия выборки	2854,76	98,11	155,4	29,18
Экссесс	-0,74	1,68	-1,22	-0,59
Асимметричность	0,53	-1,58	-0,29	0,61
Интервал	173	36	39,2	18,75
Минимум	549,65	489,15	383,65	300,65
Максимум	722,65	525,15	422,85	319,4
Сумма	19210,35	16019,95	12594,05	9543,45
Счет	30	30	30	30

Графическое представление экспериментальных данных показано на рисунке 2.8.

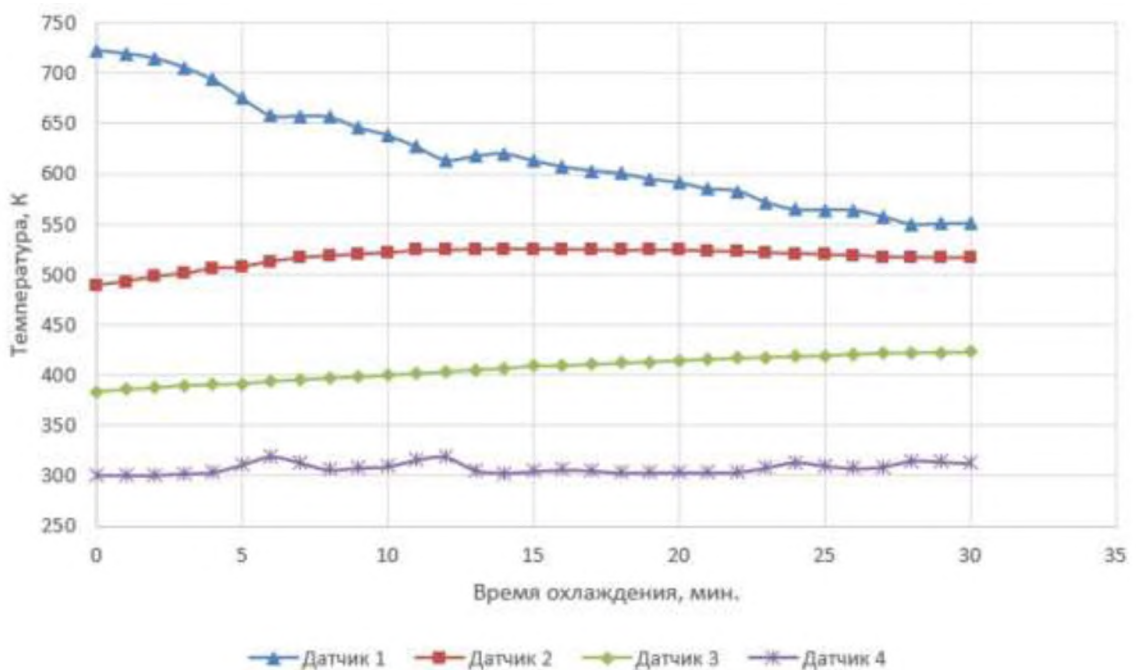


Рисунок 2.8 – Результаты оценки эффективности охлаждения порцией грунта почвенной среды с наличием лесной подстилки

Для оценки эффективности разных вариантов тушения почвенно-растительной среды грунтом целесообразно рассмотреть температурные характеристики отдельных почвенных слоёв в виде сравнения данных одинаковых датчиков.

Сравнение показателей температуры с датчика, расположенного на поверхности моделируемого лесного низового пожара, позволяет сделать вывод о том, что в случае тушения возгорания грунтом важное значение имеет наличие лесной подстилки и её толщина. На рисунке 2.9 видно, что рассеивание тепловой энергии на поверхности зоны лесного низового пожара в окружающую среду происходит менее интенсивно при наличии лесной подстилки.

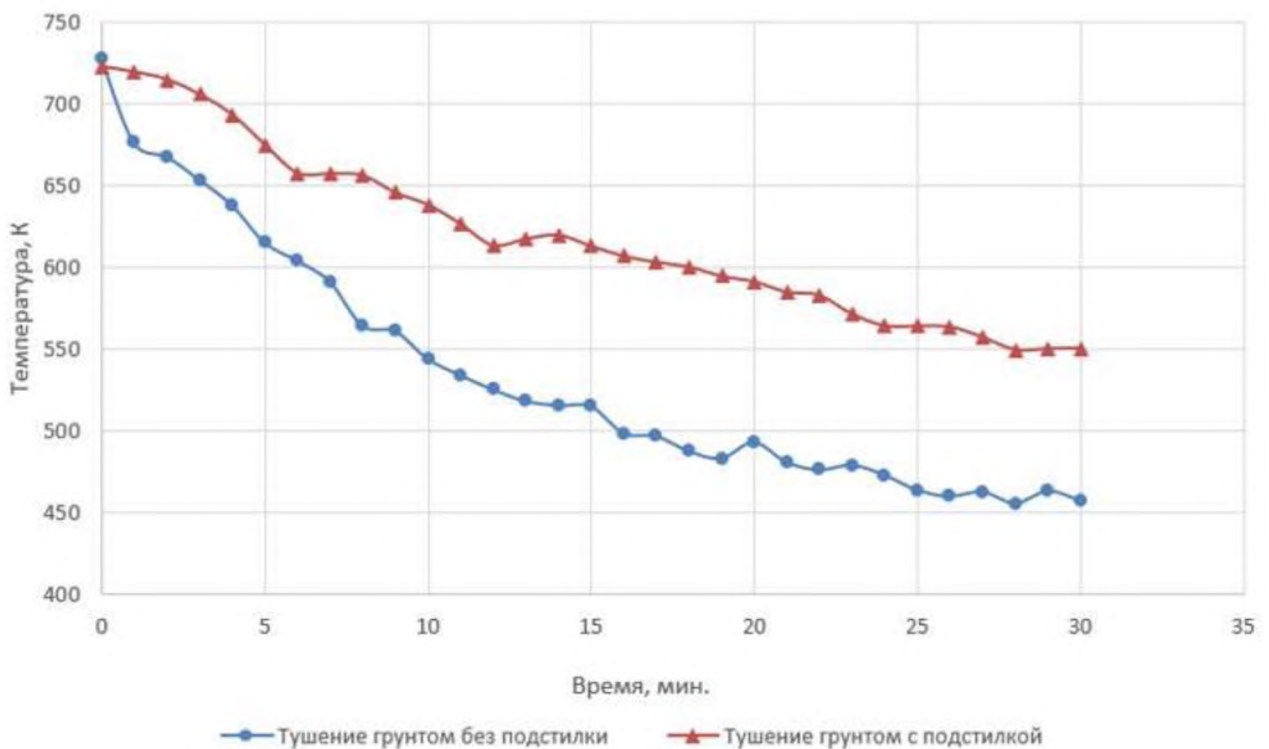


Рисунок 2.9 – Результаты оценки эффективности охлаждения порцией грунта

Аналогичные выводы позволяет сделать анализ данных с датчика, расположенного на глубине 10 мм (рисунок 2.10).

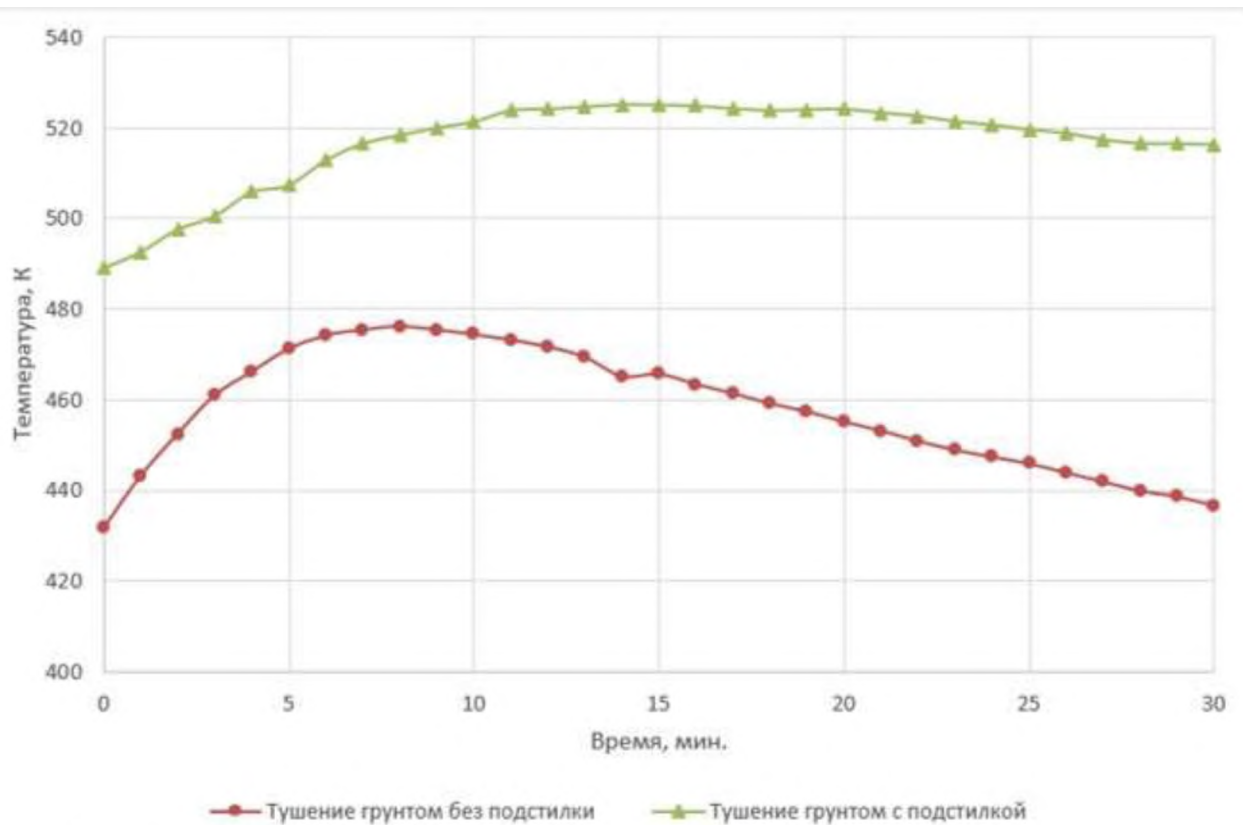


Рисунок 2.10 – Результаты совместной оценки эффективности охлаждения порцией грунта на глубине 10 мм

Характеристики температуропроводности лесного грунта не позволяют повышать температуру в нижних слоях почвы. Серия экспериментов показала, что наблюдается значительная разница данных с датчиков, установленных с интервалом 10 мм по глубине (например, в случае отсутствия лесной подстилки температура поверхности при её охлаждении в течение 10 минут составляет 271 °С, а на глубине 10 мм – 201,25 °С).

Аналогичные результаты наблюдаются и при оценке температурных данных с датчика 3, расположенного на глубине 20 мм (рисунок 2.11).

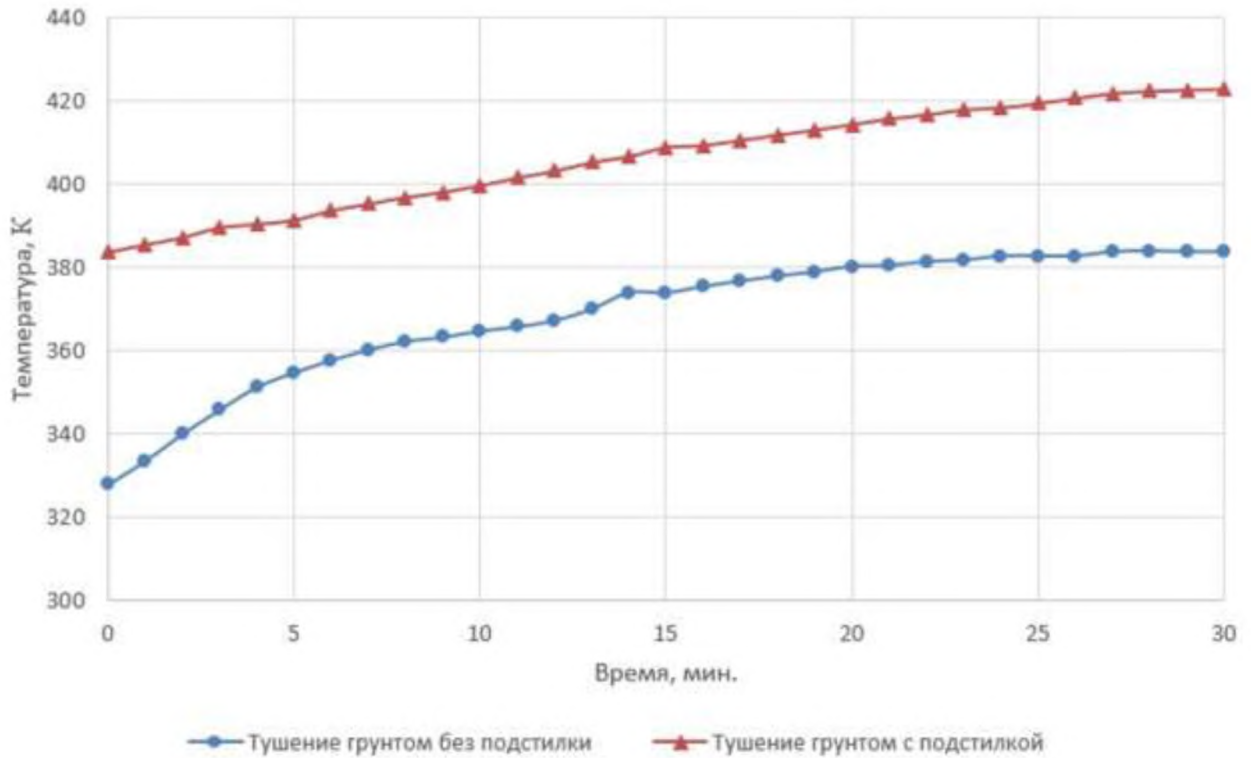
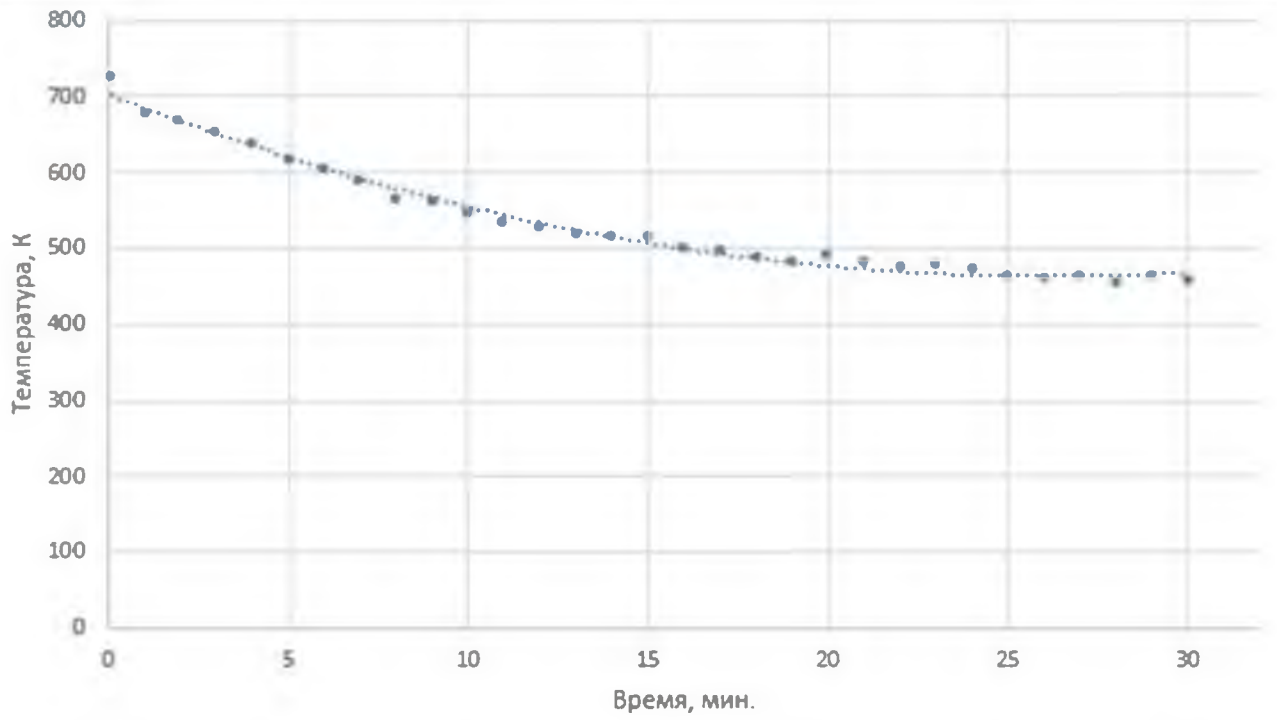


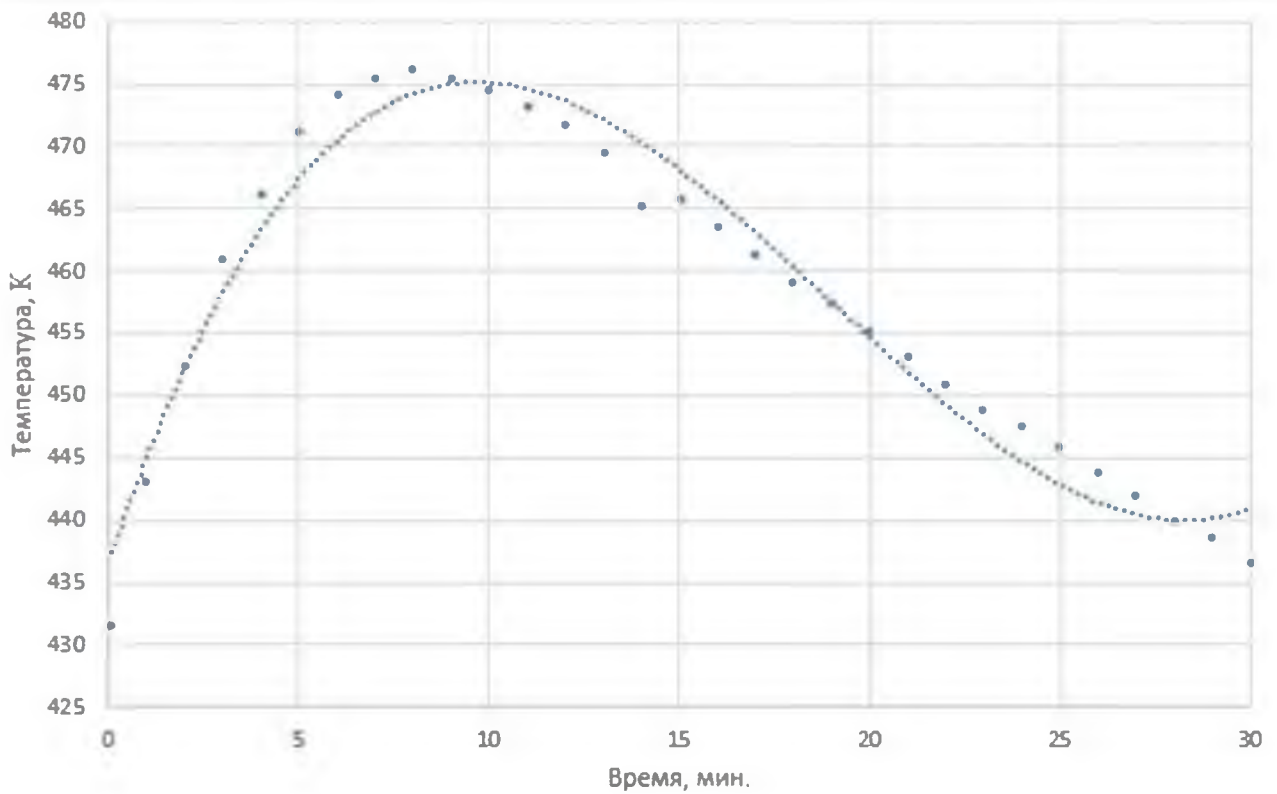
Рисунок 2.11 – Результаты совместной оценки эффективности охлаждения порцией грунта на глубине 20 мм

Регрессионный анализ – это статистический метод вторичной обработки экспериментальных данных. Его выполнение позволяет установить характер взаимосвязи между переменными в виде аналитического выражения. Исследователь может определить значение зависимой переменной Y при изменении одной или нескольких независимых переменных X_1, X_2, \dots, X_n .

На основании результатов выполненных экспериментов с помощью полиномиальной регрессии проведена аппроксимация экспериментальных данных с построением теоретических графиков значения температуры в различных почвенных уровнях в зависимости от времени охлаждения зоны лесного низового пожара (рисунок 2.12).

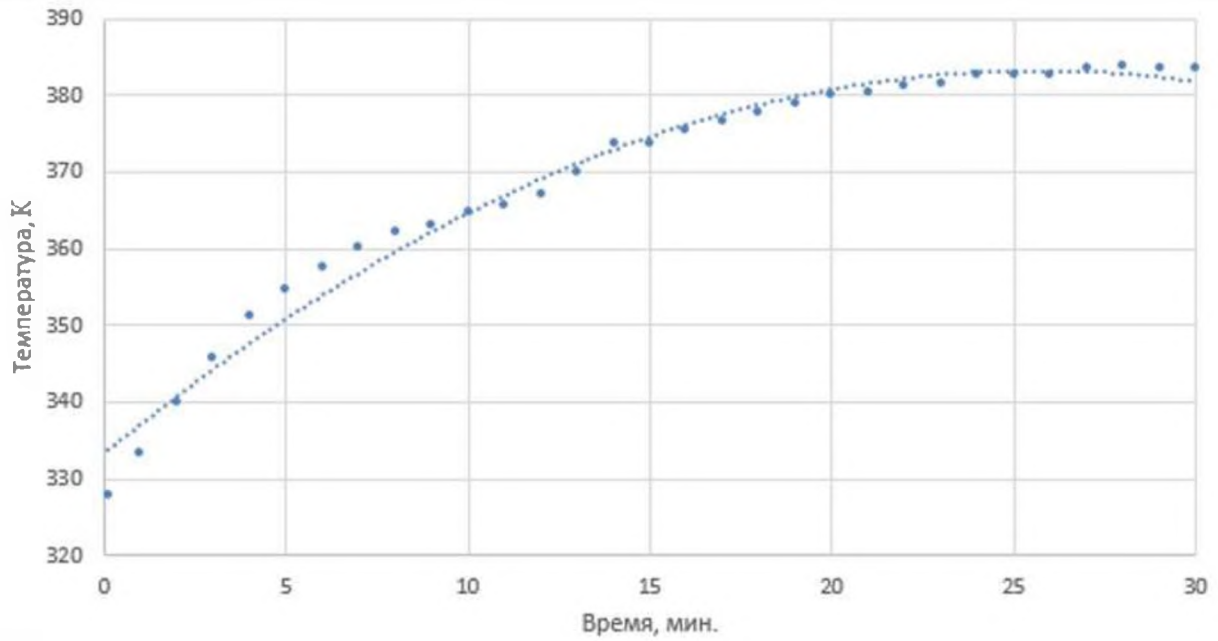


а)

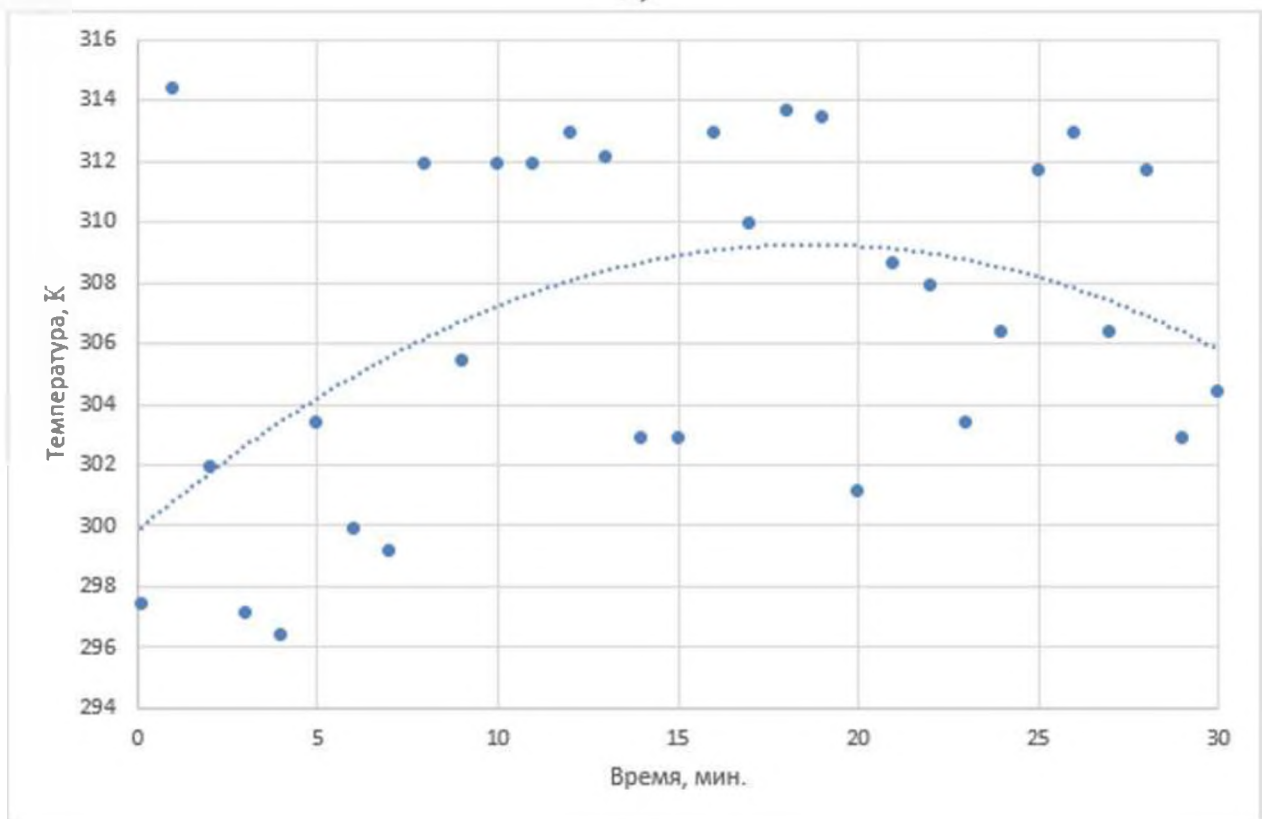


б)

Рисунок 2.12 – Регрессионная зависимость влияния времени протекания процесса охлаждения на температуру слоёв почвенно-растительной среды (а) и без лесной подстилки (б)



в)



г)

Рисунок 2.12 (Продолжение) – Регрессионная зависимость влияния времени протекания процесса охлаждения на температуру слоёв почвенно-растительной среды (в) и без лесной подстилки (г)

В результате были составлены уравнения по температурным режимам и разности глубины монтажа датчиков термопар с характеристиками времени:

для датчика 1:

$$y = 0,3509x^2 - 18,341x + 703,16;$$

$$R^2 = 0,9869; \quad (2.1)$$

для датчика 2:

$$y = 0,011x^3 - 0,6245x^2 + 9,0045x + 436,54;$$

$$R^2 = 0,7489; \quad (2.2)$$

для датчика 3:

$$y = -0,0758x^2 + 3,8918x + 333,31;$$

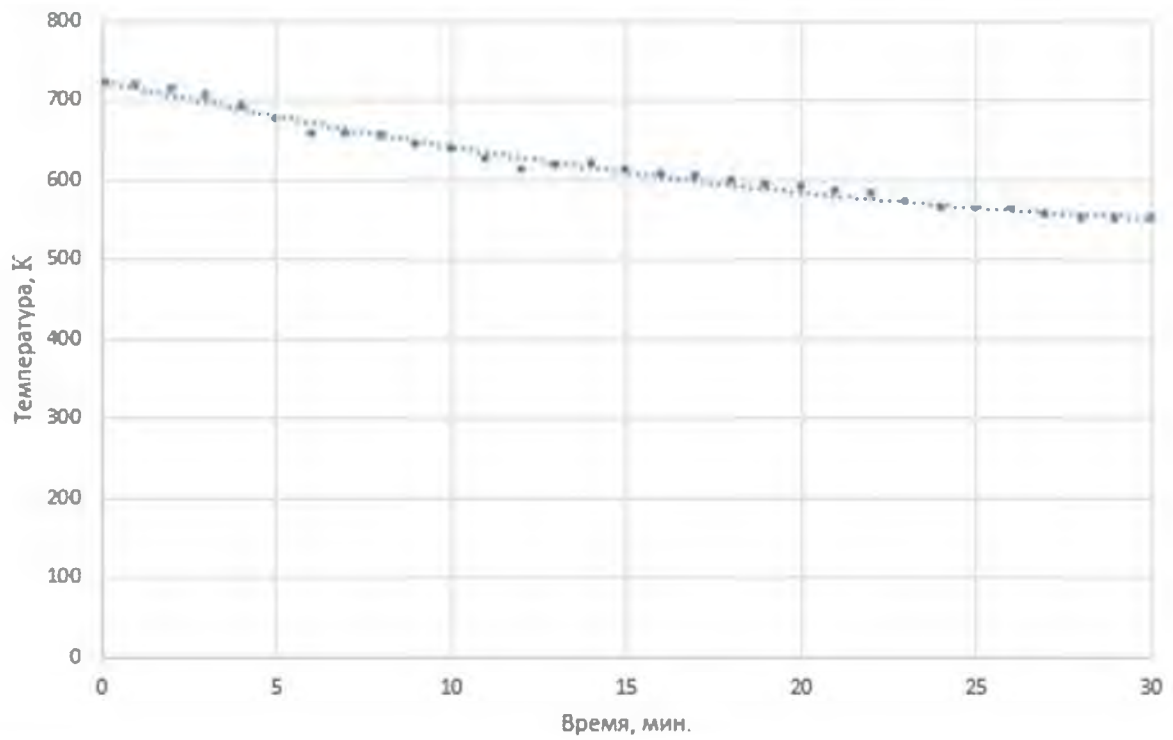
$$R^2 = 0,9825; \quad (2.3)$$

для датчика 4:

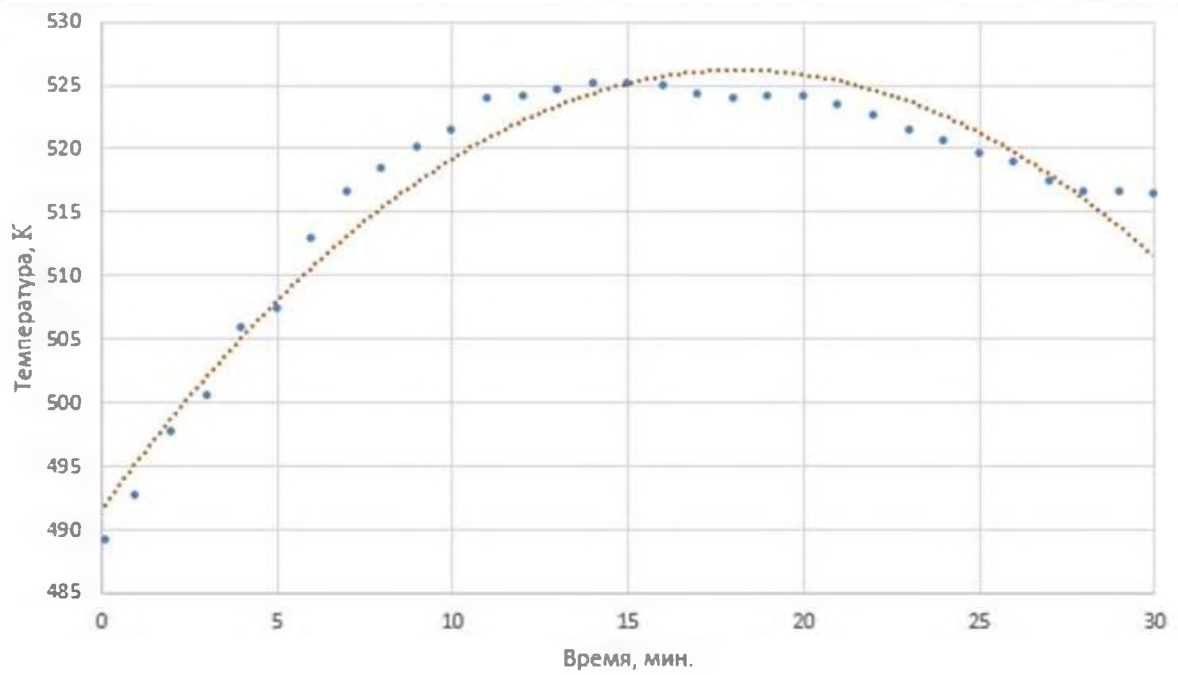
$$y = -0,027x^2 + 1,0073x + 299,85;$$

$$R^2 = 0,2206. \quad (2.4)$$

Аналогичным образом была проведена аппроксимация экспериментальных данных с построением теоретических графиков значения температуры в различных почвенных уровнях с наличием лесной подстилки в зависимости от времени охлаждения зоны лесного пожара (рисунок 2.13).



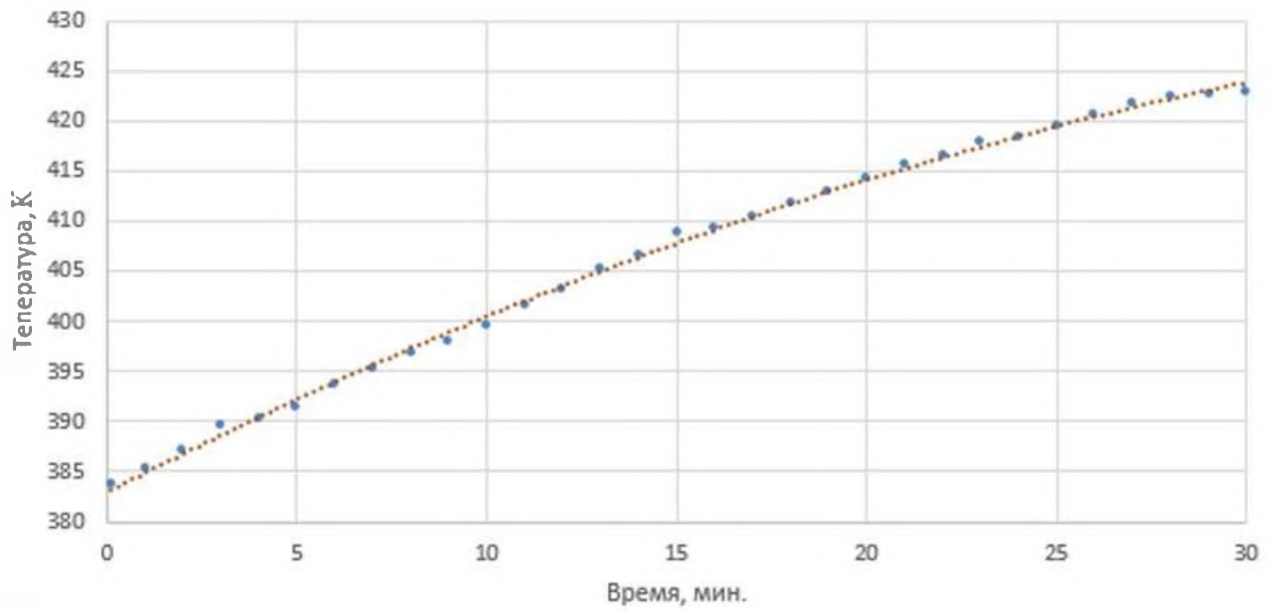
а)



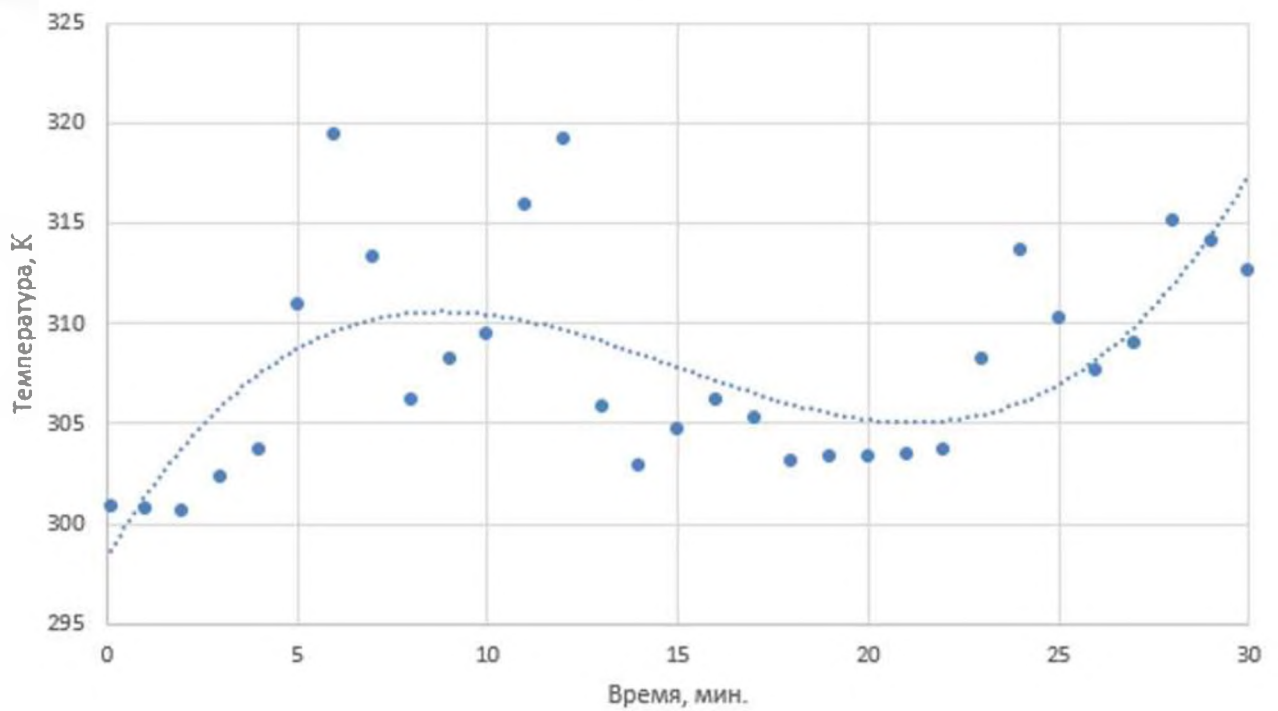
б)

а - датчик 1; б - датчик 2;

Рисунок 2.13 – Регрессионная зависимость влияния времени протекания процесса охлаждения на температуру слоёв почвенно-растительной среды с наличием лесной подстилки



в)



г)

в - датчик 3; г - датчик 4

Рисунок 2.13 (Продолжение) – Регрессионная зависимость влияния времени протекания процесса охлаждения на температуру слоёв почвенно-растительной среды с наличием лесной подстилки

Процесс тушения лесного пожара при помощи грунта по временной характеристике соотносится с охлаждением зоны остатков биологического топлива и грунта, в целях футурологии для проведения исследования характеристик выведены аналитические полиномиальные зависимости:

для датчика 1:

$$y = 0,1275x^2 - 9,579x + 724,53;$$

$$R^2 = 0,9867; \quad (2.5)$$

для датчика 2:

$$y = -0,105x^2 + 3,8082x + 491,65;$$

$$R^2 = 0,9523; \quad (2.6)$$

для датчика 3:

$$y = -0,0194x^2 + 1,945 + 383;$$

$$R^2 = 0,9983; \quad (2.7)$$

для датчика 4:

$$y = 0,0058x^3 - 0,2604x^2 + 3,2299x + 298,38;$$

$$R^2 = 0,4424. \quad (2.8)$$

2.5. Выводы

1. Тушение грунтом имеет высокую эффективность при достижении требуемого объёма грунта, подаваемого на кромку лесного низового пожара.

2. Объёма грунта для тушения кромки от 0,04 до 0,1 м³ достаточно для прекращения процесса распространения лесного низового пожара. Объёма 0,04 м³ для интенсивного охлаждения нагретой поверхности недостаточно для участков, имеющих лесную подстилку, более 0,06 м³, увеличивает время остывания поверхности.

3. Для оценки эффективности разных вариантов тушения почвенно-растительной среды грунтом целесообразно рассмотреть температурные характеристики отдельных почвенных слоёв в виде сравнения данных одинаковых датчиков.

4. Сравнение показателей температуры с датчика, расположенного на поверхности нагреваемой поверхности, позволяет сделать вывод о том, что в случае тушения лесного низового пожара грунтом важное значение имеет наличие лесной подстилки и её толщина. Рассеивание тепловой энергии на поверхности зоны лесного низового пожара в окружающую среду происходит менее интенсивно при наличии лесной подстилки.

5. Характеристики теплопроводности лесного грунта не позволяют повышать температуру в нижних почвенных слоях. Серия экспериментов показала, что наблюдается значительная разница данных с датчиков, установленных с интервалом 10 мм по глубине (например, в случае отсутствия лесной подстилки температура поверхности при её охлаждении в течение 10 минут составляет 544,15 К, а на глубине 10 мм – 474,4 К). Аналогичные результаты наблюдаются и при оценке температурных данных с датчика 3, расположенного на глубине 20 мм.

6. По результатам наблюдений за отчётные 30 минут было выявлено, что остывание верхнего слоя происходит интенсивно, а в нижних слоях температура сначала повышается, а затем также происходит рассеивание тепловой энергии в окружающую среду. Сравнение показателей температуры с датчика, расположенного на поверхности нагреваемой площади, позволяет сделать вывод о том, что в случае тушения лесного низового пожара грунтом важное значение имеет наличие лесной подстилки и её толщина. Рассеивание тепловой энергии на поверхности зоны лесного низового пожара в окружающую среду происходит менее интенсивно при наличии лесной подстилки.

7. Характеристики теплопроводности лесного грунта не позволяют повышать температуру в нижних почвенных слоях. Серия экспериментов показала, что наблюдается значительная разница данных с датчиков, установленных с интервалом 10 мм по глубине (например, в случае отсутствия лесной подстилки температура поверхности при её охлаждении в течение 10 минут составляет 544,15 К, а на глубине 10 мм – 474,4 К).

3. Обоснование технологии применения грунта для борьбы с лесными пожарами

3.1. Модель процесса тушения лесного пожара потоком грунта

При высоко детализованном моделировании лесных пожаров необходимо учитывать в модели множество факторов:

- несколько сред (почва, слои лесной подстилки, поток грунта);
- статистико-геометрические особенности (структуру) лесной подстилки;
- механическое движение и рассеивание потока грунта в воздушной среде;
- механическое взаимодействие потока грунта со слоями лесной подстилки и лесной почвой;
- процесс движения лесного пожара в исследуемых средах;
- процесс лесного пожара (воспламенение, процесса развития лесного пожара, тушение лесного пожара).

Для одновременного воспроизведения перечисленных многообразных и сложных процессов модель должна обладать высокой универсальностью и высоким пространственным разрешением. Большую эффективность для моделирования систем данного класса имеет метод динамики частиц, который очень часто применяют в различных отраслях науки и техники [70]. Для достижения заданного уровня пространственного разрешения метод используется с возможностью развития в области компьютерных технологий.

В рамках метода рассматриваемые среды моделируемой системы разбиваются на большое количество (5000–20000) элементов (рисунок 3.1). Моделирование производится в двухмерном пространстве XZ с учетом симметрии задачи: процесс практически не изменяется вдоль оси Y , поэтому нетривиальные результаты могут быть получены при рассмотрении измерений по осям X и Z .

Элементы имеют одинаковую круглую форму с одинаковым диаметром d_0 (на рисунке 3.1 диаметр «горячих» элементов увеличен для визуального восприятия, однако при моделировании физических свойств системы диаметры всех элементов одинаковы).

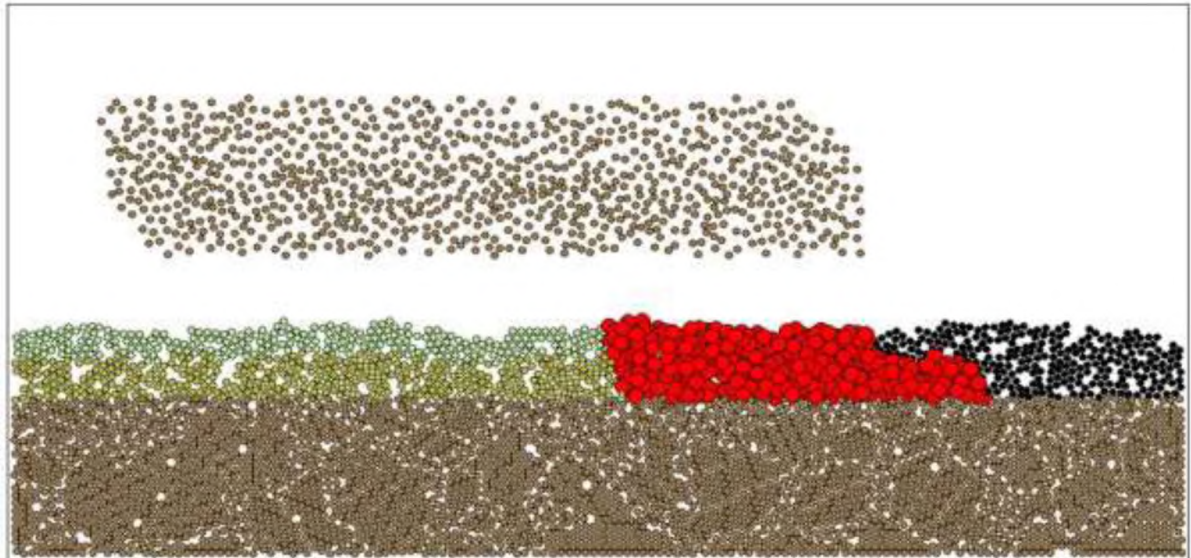


Рисунок 3.1 – Представление в модели потока грунта и слоев лесной подстилки

В имитационной модели заданы одновременно четыре типа элементов. В группу, представляющей лесную подстилку, входят два уровня: верхний и нижний. В исследовании грунт делится на объекты в виде лесной почвы и поток грунта, формируемый от грунтометательной машины.

В имитационной модели объекты разнесены на четыре вида:

- объекты, находящиеся в верхнем ярусе;
- объекты, находящиеся в нижнем ярусе;
- лесной грунт;
- грунт, формируемый грунтометательной машиной.

В процессе компьютерного эксперимента по тушению лесного пожара элементы совершают движение, основанное на основных принципах законов классической механики в процессе симуляции, когда происходит контакт с рабочими плоскостями.

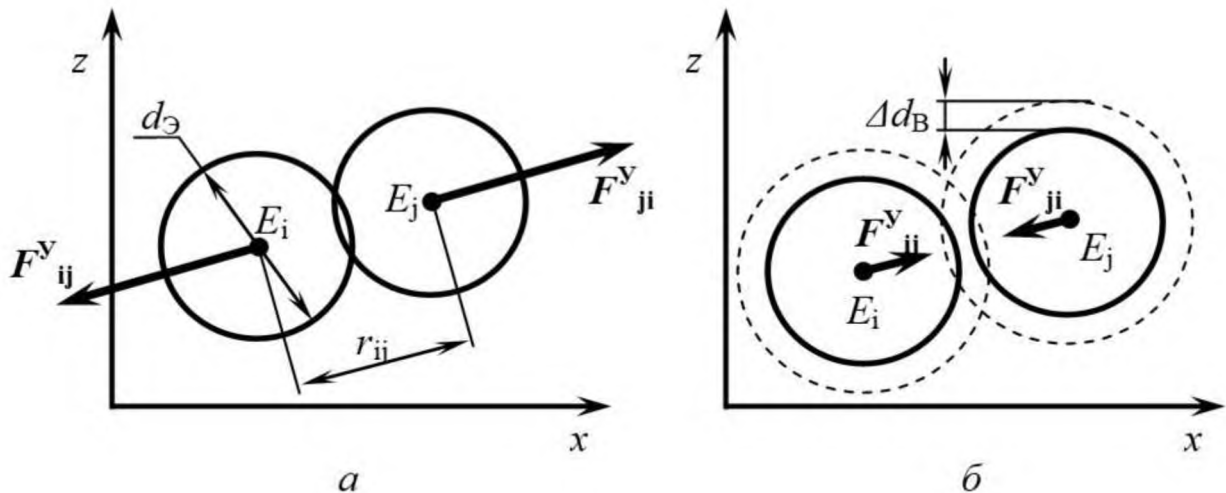
3.2. Механика и термодинамика тушения низового лесного пожара потоком грунта (методика моделирования)

Отображение механического движения частиц. Настоящее положение элемента i описано 4 аргументами: координатами центра элемента (x_i, z_i) и декартовыми компонентами скорости (v_{xi}, v_{zi}) .

Механическая связь элементов задана как вязкоупругое взаимодействие между частицами. Такой подход дал возможность внести в модель основные характеристики изучаемых сред:

- силу адгезии;
- коэффициент внутреннего трения;
- модуль упругости.

В имитационной модели добавлены контактные характеристики частиц грунта с учетом сил отталкивания при нарушении целостности элемента (рисунок 3.2, а), а также в процессе разрыва взаимосвязей увеличение расстояния у близко расположенных элементов (рисунок 3.2, б).



а – при внедрении элементов друг в друга возникают силы отталкивания;
 б – при удалении элементов друг от друга до определенного расстояния Δd_B возникают силы притяжения

Рисунок 3.2 – Иллюстрация к вопросу возникновения сил между контактирующими элементами

Если происходит разрыв связей (удаление) между рассматриваемыми элементами, взаимодействующие силы обнуляются, момент разрыва указывается как критическое расстояние удаления Δd_B . Имитационная программа содержит частицы почвы, которые описаны по второму закону Ньютона:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\ominus}} \left(\left\{ \begin{array}{l} c_{ij}(d_{\ominus} - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_{ij}(r_{ij} - d_{\ominus})(v_{xi} - v_{xj}), \quad r_{ij} < d_{\ominus} + \Delta d_{Bij}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq d_{\ominus} + \Delta d_B; \end{array} \right. \right); \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -m_i g + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{\ominus}} \left(\left\{ \begin{array}{l} c_{ij}(d_{\ominus} - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_{ij}(r_{ij} - d_{\ominus})(v_{zi} - v_{zj}), \quad r_{ij} < d_{\ominus} + \Delta d_{Bij}; \\ 0, \quad r_{ij} \geq d_{\ominus} + \Delta d_B; \end{array} \right. \right); \end{array} \right. \quad (3.1)$$

где i – номер элемента;

m_i – масса i -го элемента, кг;

x_i, z_i – декартовы координаты элемента, м;

t – время, с;

N_{\ominus} – количество элементов;

j – номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом;

c_{ij} и – коэффициент жесткости элементов i и j , Н/м;

k_{ij} – коэффициент вязкости взаимодействия элементов, Н·с/м

r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j , м;

v_{xi}, v_{zi} – декартовы составляющие скорости i -го элемента, м/с;

$d_{\ominus} + \Delta d_{Bij}$ – расстояние ограничения взаимодействия между элементами, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Расстояние r_{ij} между центрами элементов рассчитывается через координаты их центров по теореме Пифагора: $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$.

Система дифференциальных выражений второго порядка (3.1) в совокупности с начальными условиями (задание начальных координат и скоростей элементов) позволяет определить множество траекторий движения элементов в пространстве. На основе множества функций-траекторий

появляется возможность изучить эволюцию системы элементов и отыскать числовые показатели эффективности процесса.

В начальный момент времени элементы почвы и лесной подстилки распределяются в области модельного пространства размером $L_x \times L_z$. Это производится по формулам:

$$\begin{cases} x_i = \frac{d_{\text{Э}}}{2} + F_{1i}(L_x - d_{\text{Э}}); \\ z_i = \frac{d_{\text{Э}}}{2} + F_{2i}(L_z - d_{\text{Э}}); \\ v_{xi} = 0; \\ v_{zi} = 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

где i – порядковый номер элемента ($i = 1 \dots N_{\text{Э}}$);

x_i, z_i – координаты элемента в декартовой системе координат;

v_{xi}, v_{zi} – скорости движения элемента в декартовой системе координат;

F_{1i}, F_{2i} – последовательные реализации одной и той же случайной величины, которая распределена по равномерному закону и может составлять от 0 до 1 (в данном случае реализуется оператором «Random» на языке Object Pascal).

Каждому элементу i присваивается тип T_i , в зависимости от того, какую среду составляет элемент:

- 1 – метаемый грунт,
- 2 – верхний слой лесной подстилки,
- 3 – нижний слой лесной подстилки,
- 4 – лесная почва.

В зависимости от типа каждому элементу соотносятся четыре физические характеристики:

где m_i – масса, кг;

c_i – коэффициент жёсткости, Н/м;

k_i – коэффициент вязкого трения, Н·с/м;

$\Delta d_{\text{В}i}$ – расстояние ограничения взаимодействия, м.

Массы элементов $m_{\text{МГ}}, m_{\text{ВС}}, m_{\text{НС}}, m_{\text{ЛП}}$ рассчитываются по объёмной плотности соответствующих сред $\rho_{\text{МГ}}, \rho_{\text{ВС}}, \rho_{\text{НС}}, \rho_{\text{ЛП}}$ путём умножения на условный

объем элемента

$$m_i = \rho \cdot V_{\text{Э}} = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d_{\text{Э}}}{2} \right)^3 \cdot k_{\Phi} = \frac{\pi}{6} \rho d_{\text{Э}}^3 k_{\Phi}, \quad (3.3)$$

где ρ – объёмная плотность среды, кг/м³;

$V_{\text{Э}}$ – объем элемента, м³;

k_{Φ} – коэффициент формы, необходимый для учёта преобразования шарообразных элементов в круговые и неполного заполнения пространства.

Коэффициенты жёсткости взаимодействия элементов $c_{\text{МГ}}$, $c_{\text{ВС}}$, $c_{\text{НС}}$, $c_{\text{ЛП}}$ рассчитываются по модулям упругости рассматриваемых сред $E_{\text{МГ}}$, $E_{\text{ВС}}$, $E_{\text{НС}}$, $E_{\text{ЛП}}$:

$$c = E \cdot \frac{\pi d_{\text{Э}}}{4} k_{\Phi}, \quad (3.4)$$

где E – модуль упругости среды, Па.

Коэффициенты вязкого трения $k_{\text{МГ}}$, $k_{\text{ВС}}$, $k_{\text{НС}}$, $k_{\text{ЛП}}$ определяются по табличным значениям параметров внутреннего трения рассматриваемых сред $\theta_{\text{МГ}}$, $\theta_{\text{ВС}}$, $\theta_{\text{НС}}$, $\theta_{\text{ЛП}}$.

Параметры ограничения взаимодействия элементов $\Delta k_{\text{ВМГ}}$, $\Delta k_{\text{ВВС}}$, $\Delta k_{\text{ВНС}}$, $\Delta k_{\text{ВЛП}}$ определяются по величине предельной деформации рассматриваемых сред $\varepsilon_{\text{МГ}}$, $\varepsilon_{\text{ВС}}$, $\varepsilon_{\text{НС}}$, $\varepsilon_{\text{ЛП}}$ при испытаниях на растяжение.

После случайного распределения в пространстве элементов лесной почвы и двух слоёв лесной подстилки первоначально нестабильная механическая система приходит в механическое равновесие и оседает в нижнюю часть пространства моделирования. Этот процесс занимает около 10 секунд в процессе моделирования. В то же время производится численное интегрирование выражения движения частиц. По окончании данного этапа элементы формируют случайную плотную упаковку.

Затем модельная система разбивается на три слоя: верхний и нижний слои лесной подстилки, лесная почва:

$$p_i = \begin{cases} 4, & z_i > z_c; \\ 3, & z_n \leq z_i \leq z_c; \\ 2, & z_i < z_n, \end{cases} \quad (3.5)$$

где p_i – тип элемента i (принимает значения 1 – грунт от грунтометательной машины, 2 – лесная почва, 3 – нижний слой лесной подстилки, 4 – верхний слой лесной подстилки);

z_c – вертикальная координата прямой, разделяющей верхний и нижний слои лесной подстилки;

z_n – уровень (вертикальная координата) лесной почвы.

Для придания правдоподобной структуры в двух слоях лесной подстилки производится их прореживание: удаление из случайной плотной упаковки заданной доли случайно выбранных элементов, принадлежащих слоям.

В зависимости от уровня прореживания можно воспроизводить различные варианты лесной подстилки с различным видовым составом и плотностью.

Общая система уравнений и метод ее решения. Уравнения (3.1) имеют вид дифференциальных выражений второго порядка, общий вид которых

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k_1 \frac{dx}{dt} + k_2 x + k_3 \quad (3.6)$$

или в сокращённом виде

$$ma = k_1 v + k_2 x + k_3, \quad (3.7)$$

где m – масса элемента, кг;

x – функция временной зависимости координаты x или z , м;

t – время, с;

k_1, k_2, k_3 – величины, не зависящие от x , но, возможно, зависящие от других искомым функций данной системы уравнений, Н·с/м, Н/м, Н;

a – ускорение (в данном случае декартовы компоненты a_x или a_z), м/с²;

v – скорость (в данном случае декартовы компоненты v_x или v_z), м/с.

Обозначенные выражения с учетом первоначальных данных обозначены

задачей «Коши». Метод «Рунге-Кутта» использован в процессе решения описанных выражений [70].

Выполнение теоретических обозначений произведено по формулам:

$$x^{\tau+1} = x^{\tau} + v^{\tau} \cdot \Delta t + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \quad (3.8)$$

$$v^{\tau+1} = v^{\tau} + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \Delta t, \quad (3.9)$$

где Δt – величина шага интегрирования, с;

τ и $\tau+1$ – соответственно текущий и последующий шаг интегрирования по времени.

Шаг численного интегрирования системы дифференциальных уравнений составляет $\Delta t = 0,0005$ с.

Описанная численная система выражений имеет второй порядок точности по отношению к искомому выражению $x(t)$.

Применяемый метод считается многофункциональным с возможностью использования для большого круга задач. Так же к плюсам относится скорость создания программного обеспечения для научных исследований.

Модельные частицы при запуске алгоритма задаются координатами, при этом скорость каждой частицы равна нулю:

$$v_{xi}^0 = 0,$$

$$v_{zi}^0 = 0.$$

Движение элементов производится в заранее заданной области $L_x \times L_z$. Если происходит нарушение границы заданной области, производится принудительный возврат элемента. То есть когда x_i нарушает граничные линии заданной области L_x , происходит корректировка значений координат и характеристики скоростей частицы.

$$\text{если } x_i > L_x, \text{ то } x_i = L_x; v_{xi} = -v_{xi}.$$

Для проведения исследования в составленной модели обозначены моменты упрощения, слабо влияющие на процесс. Например: модель имеет двумерную форму представления, а рассматриваемые частицы в модели принято считать сплошной средой в области единого элемента, перемещение частиц выполняется механическим контактом друг с другом, что соответствует законам классической динамики, каждая представленная частица считается однородной в рамках очертания частицы имеющая плотность и механические свойства, механическая взаимосвязь частиц относительно друг с другом описывает упруго-вязкое отношение. В имитационной модели частицы описаны пятью измеримыми параметрами (диаметром, массой, коэффициентом жесткости, вязкостью и ограничением взаимодействия). В целом решение многоэлементной системы (20 000 уравнений) считается устойчивой.

3.3. Моделирование термодинамических особенностей процесса тушения лесного пожара

Для моделирования процесса тушения лесного пожара необходимо воспроизвести в модели три основных физических процесса:

- механическое воздействие потока грунта на лесную подстилку (осуществляется методом динамики частиц по приведённой выше методике);
- распространение лесного пожара в четырёх рассматриваемых средах;
- воспламенение, процесс лесного пожара, угасание лесного пожара в верхнем и нижнем слоях лесной подстилки.

Для моделирования распространения лесного пожара в рассматриваемых средах используется уравнение теплопроводности. Данное уравнение в общем виде можно записать

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) = (\nabla, \chi(\vec{r}, t) \nabla T(\vec{r}, t)) + Q(\vec{r}, t), \quad (3.10)$$

где $T(\vec{r}, t)$ – распределение температуры в пространстве и его изменение с течением времени, К;

\vec{r} – радиус вектор исследуемой точки пространства, м;

t – время, с;

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ – дифференциальный оператор набла, м⁻¹;

x, z – декартовы координаты исследуемой точки пространства, м;

\vec{i}, \vec{k} – единичные векторы в декартовом пространстве;

$(\ , \)$ – скалярное произведение;

$\chi(\vec{r}, t)$ – коэффициент температуропроводности среды (в общем случае зависит от положения в пространстве и времени), м²/с;

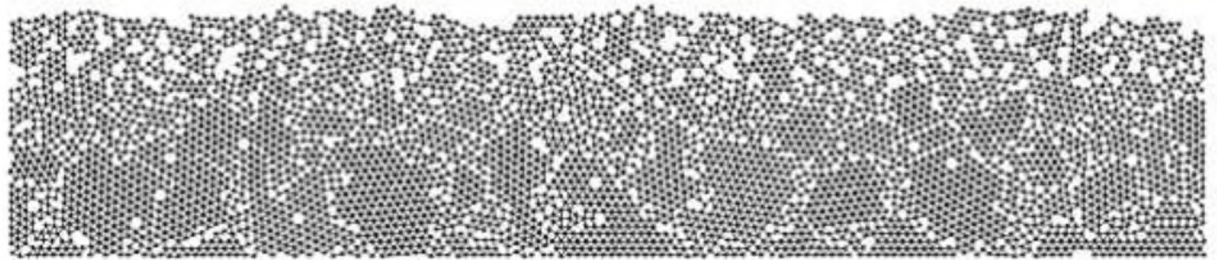
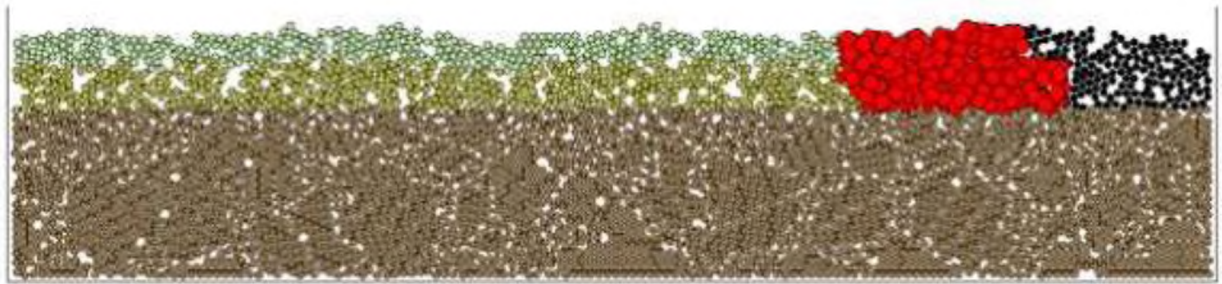
$Q(\vec{r}, t)$ – изменяющееся с течением времени поле источников нагрева и охлаждения, Дж/с.

Найти коэффициент температуропроводности возможно через коэффициенты теплопроводности κ , теплоемкости c и плотности вещества ρ следующим образом:

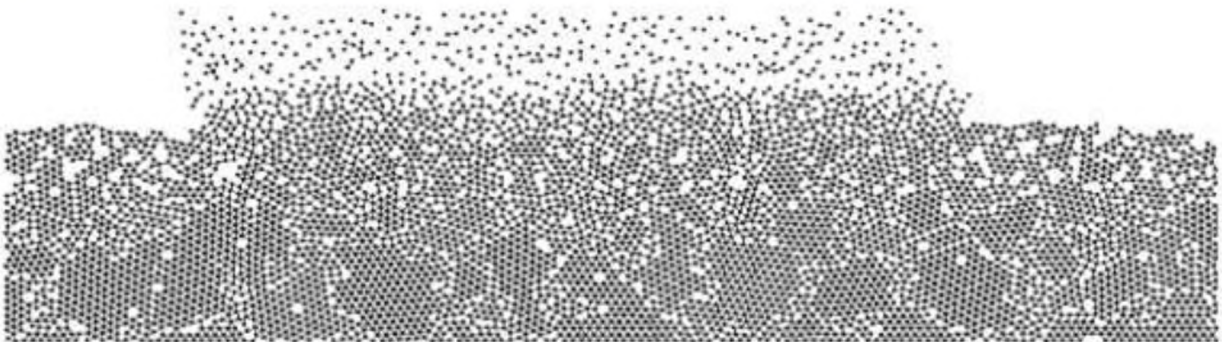
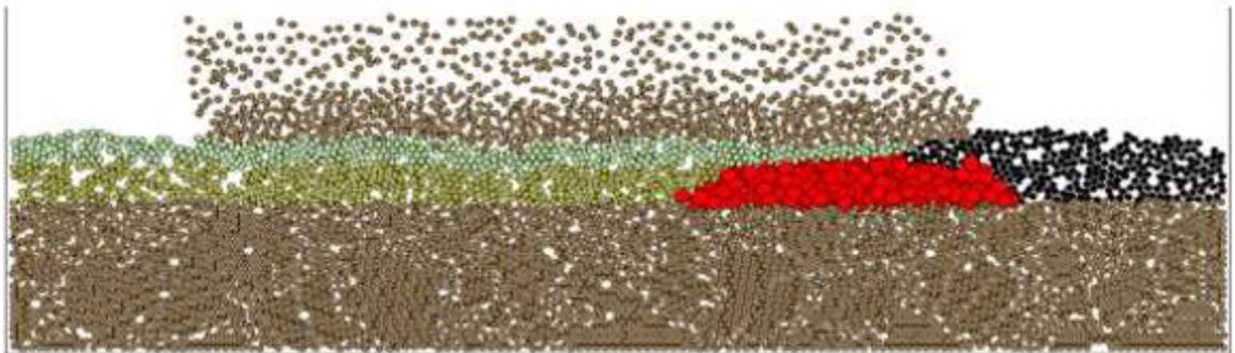
$$\chi = \kappa / (c \cdot \rho)$$

На основании вышеизложенного выражения (3.9) возможно предположить, что такой подход высоко точен, что сказывается на представлении конечного результата. Представляется оптимальным использовать аналитический подход: одномерное приближение, строго прямоугольная форма образцов, постоянный коэффициент χ и т.п. Решение составленной модели позволяет провести исследование продвижения и тушения кромки лесного пожара, выполненное при помощи сеточных конечно-разностных численных методов [70].

Для решения уравнения используется нерегулярная сетка. Узлами сетки являются текущие центры элементов рассматриваемых сред (рисунок 3.3).



а)



б)

a – в процессе распространения кромки лесного пожара в слоях лесной подстилки; *б* – в процессе взаимодействия потока грунта с фронтом горения

Рисунок 3.3 – Схематичные изображения (вверху) и соответствующие сетки для решения уравнения теплопроводности (внизу):

Изменение температуры каждой частицы, представленной в модели, происходит на каждом шаге интеграции τ , процесс производится по формуле:

$$T_{\Pi i}^{\tau+1} = T_{\Pi i}^{\tau} + \chi_{ij} \frac{T_{\Pi j}^{\tau} - T_{\Pi i}^{\tau}}{r_{ij}} \Delta t \quad (3.11)$$

где χ_{ij} – коэффициент передачи температуры от элемента j элементу i , m^2/c ;

Для синхронизации одновременно протекающих процессов шаг интегрирования по времени уравнения теплопроводности приравнивается к шагу интегрирования по времени уравнений движения элементов, поэтому процессы механического воздействия и изменения формы происходят одновременно с процессами распространения лесного пожара и горения лесной подстилки.

В процессе теоретического исследования временной интервал с «поджогом» биологического топлива верхнего слоя выполняется в первую очередь. Категория частиц лесной подстилки, находящаяся в декартовом пространстве с правой стороны в процессе имитации, подвергается температуре $T_{\Pi} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Режим горения в целях проведения научных исследований намерено превышает критическую температуру «возгорания» ($T_{\text{к}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

В начальном моменте имитационного исследования «поджог» различается свойствами рабочей среды, что влияет на процесс протекания лесного пожара, по отношению к верхнему и нижнему слоям гумусового отложения. Имитационная программа просчитывает поэтапное продвижение лесного пожара и температурного режима в исследуемой области.

Имитационное исследование учитывает каждый элемент области лесного пожара как в нижней части, так и в верхней части и имеет запас C_i химических веществ, которые положительно способствуют продолжению развития лесного пожара. Свойства C_i во время процесса сгорания модельного элемента снижается с 1 до 0, частицы с $C_i = 0$ графически отображаются как «выгоревшие» (например, рисунок 3.1, 3.3, 3.5-3.10, 3.12), закрашены черным цветом. Возгорание частиц происходит, когда температурный режим преодолевает значение критической температуры $T_{\text{к}}$. Отображение рендеринга

выполнения процедуры имитационного лесного пожара, в котором элемент подвергается воздействию с температурными характеристиками выше 700 °С.

Скорость процесса горения частиц указывается соразмерной температуре, и появляется возможность описать выражением:

$$\frac{dc_i}{dt} = -k_T T_i, \quad (3.12)$$

где k_T – коэффициент скорости горения, c^{-1} ;

Продвижение лесного пожара по обоим ярусам горючего материала протекает различно, так как наблюдается разница характеристики температуропроводности материалов, объема биологического вещества, критической температуры воспламенения, контакта с соседними средами.

Схема, описывающая графически алгоритм, используемый в процессе моделирования продвижения лесного пожара и процесса его тушения при помощи порции грунта, указан на рисунке 3.4.

Разработанная модель не является простой аналитической, состоящей из одной или нескольких формул для последовательного расчёта, как было принято на определенном этапе развития науки до появления возможности имитации процессов на компьютерах. Для повышения физической адекватности модели в ее основу заложена система большого количества (порядка 10^4) дифференциальных уравнений, решаемых численным методом. Результатом моделирования является совокупность функций-решений дифференциальных уравнений, по которым на следующем этапе рассчитываются функционалы – показатели эффективности процесса тушения лесного пожара. Для моделей данного типа – алгоритмических моделей – важную роль играет последовательность расчётов.

В ходе расчёта по разработанному математическому аппарату необходимо выполнить три цикла, которые вложены один в другой. Первый цикл по номеру компьютерного эксперимента, второй – по номеру временного шага и третий – по номеру элемента.

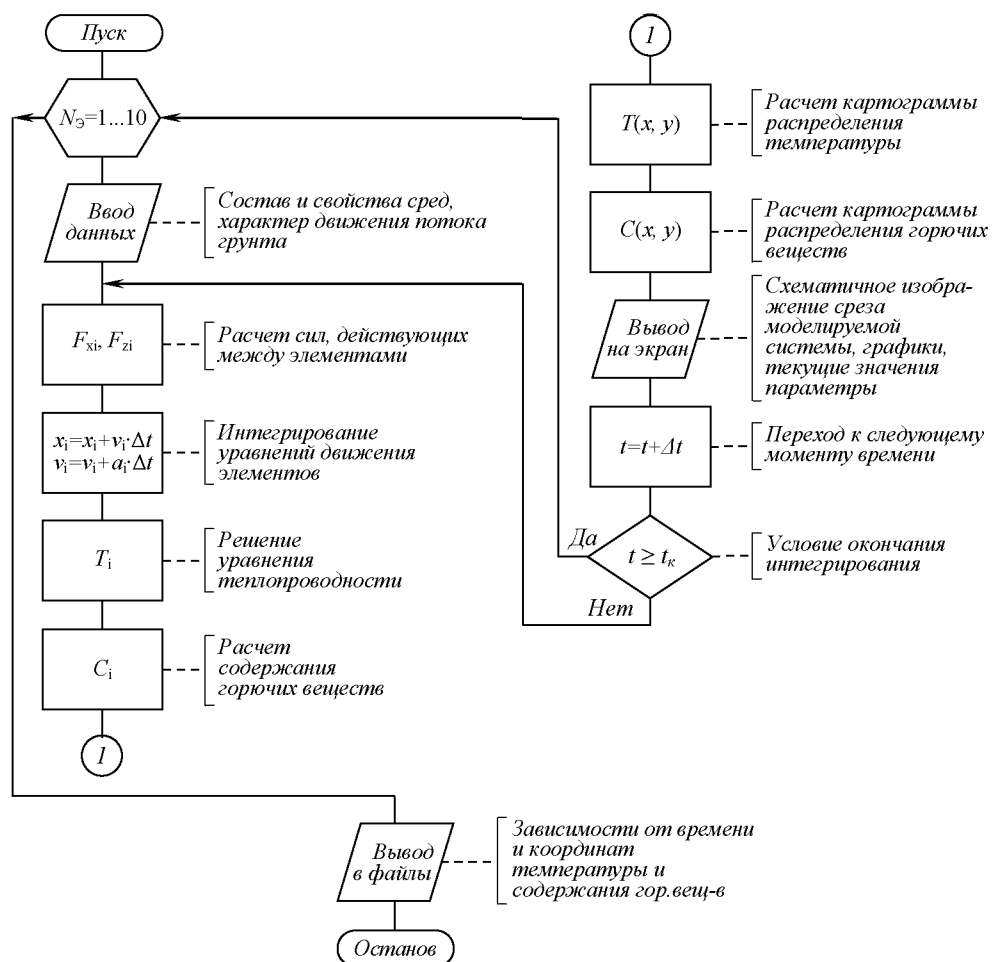


Рисунок 3.4 – Схема алгоритма моделирования процесса тушения лесного пожара потоком грунта

В алгоритме расчёта можно схематично представить, как блок-схему алгоритма (рисунок 3.4). В ходе работы программы происходит однократное проведение компьютерного эксперимента с заданными исходными данными, либо проведение серии компьютерных экспериментов с изменяющимися по заданному плану исходными данными. В процессе исследования разработана и запатентована [70] компьютерная программа, предназначенная для изучения процесса тушения лесного пожара потоком грунта, позволяющая определить оптимальные параметры потока грунта.

Программа позволяет моделировать процессы распространения лесного пожара и горения в нижней части лесной подстилки, а также и в верхних зонах с учетом механического и теплового воздействия порций грунта с биологическим топливом. Возможен вывод показателей программы: срез

летающих порций грунта в движении, картограмма распределения температуры и горячей поверхности, графики зависимости температуры от горизонтальной координаты и времени (рисунок 3.5).

Программа применима для различных вариантов структуры нижних и верхних слоёв биомассы, различных типов наземного лесного пожара.

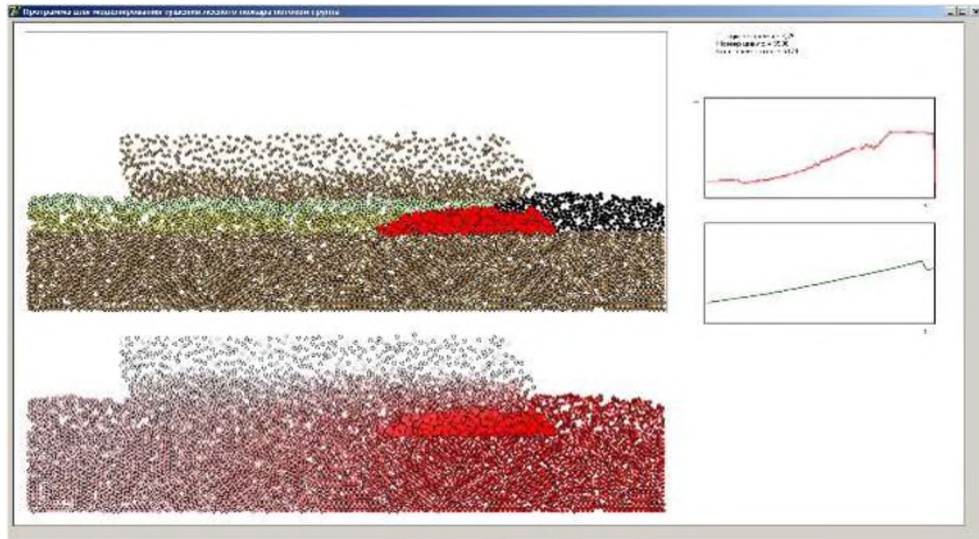


Рисунок 3.5 – Интерфейсная форма вывода результатов моделирования тушения лесного пожара потоком грунта: вертикального среза слоёв лесной почвы и биомассы с движущимся потоком грунта, картограммы распределения температуры, графиков зависимости температуры от горизонтальной координаты и времени

На первых этапах настройки модели добились воспроизведения процесса распространения лесного пожара (рисунок 3.6). После процесса имитации поджога лесной подстилки, справа на влево лесной пожар распространяется с разной скоростью в её верхних и нижних слоях. В местах прохода лесного пожара протекающие процессы в лесные подстилки соответствуют прогоранию химических веществ, сопутствующие процессу лесного пожара (отмечено на рисунках в данной главе черным цветом). После прохода лесного пожара вся

модельная система принимается как выгоревшая с процессом медленного остывания с продолжением численного интегрирования уравнения движения.

Таким образом, имитационная модель воспроизводит на качественном физическом уровне процесс лесного пожара в слоях лесной подстилки, соответствующий реальному низовому лесному пожару.

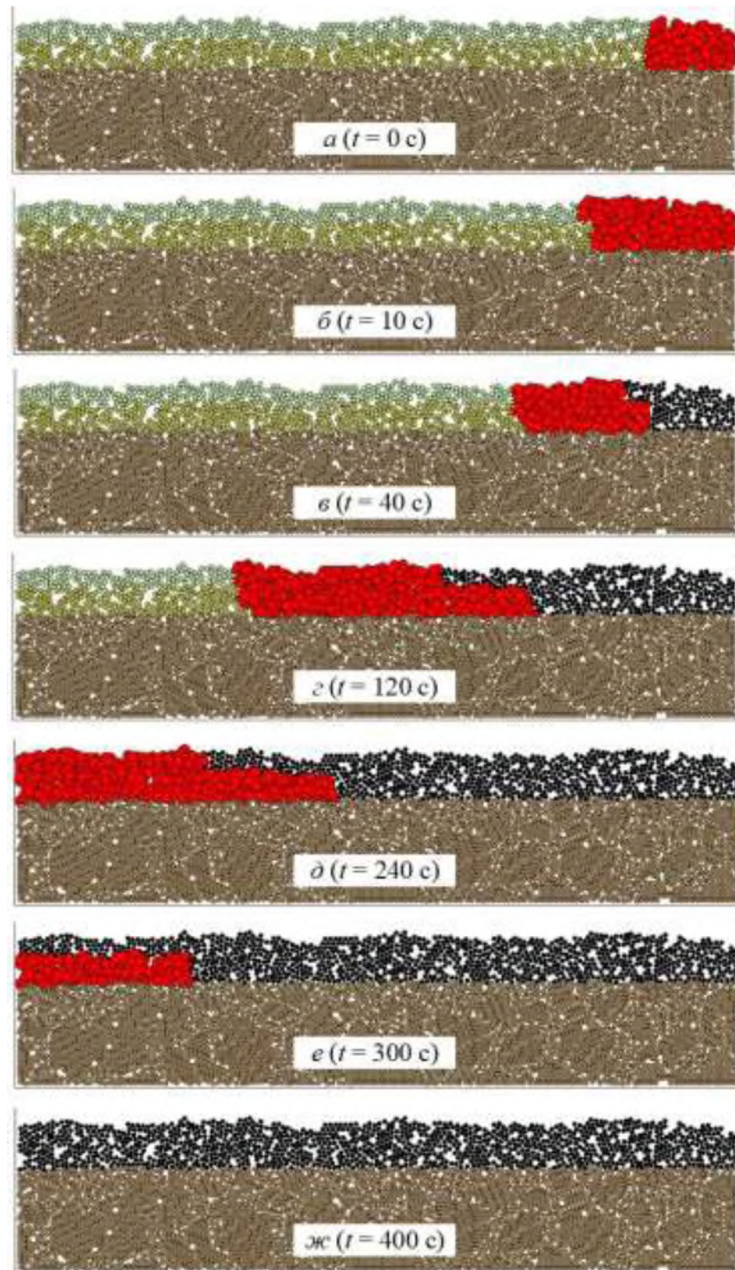


Рисунок 3.6 – Последовательность состояний системы в процессе моделирования распространения лесного пожара в слоях лесной подстилки

3.4. Исследование на основе модели процесса тушения лесного пожара потоком грунта

Поступление порции грунта на горящую лесную подстилку с достаточно высоким уровнем физической адекватности воспроизводится в разработанной модели (рисунок 3.7).

Поток грунта оказывает как механическое воздействие на горящую лесную подстилку, сбивая кромку лесного пожара (рисунок 3.7), так и тепловое воздействие, отбирая тепло у горящей лесной подстилки, делая температуру ниже температуры возгорания среды (рисунок 3.8).

В зависимости от объёма подаваемого грунта процесс тушения пожара грунтом может быть эффективным или неэффективным.

Процесс механического сбивания кромки лесного пожара сдвинут по времени относительно процесса отбора тепла, происходящего позже (рисунок 3.9). Результат эксперимента с выводом – будет ли потушен лесной пожар, зависит от того, насколько успешной будет комбинация этих двух факторов процесса тушения лесного пожара (рисунок 3.10).

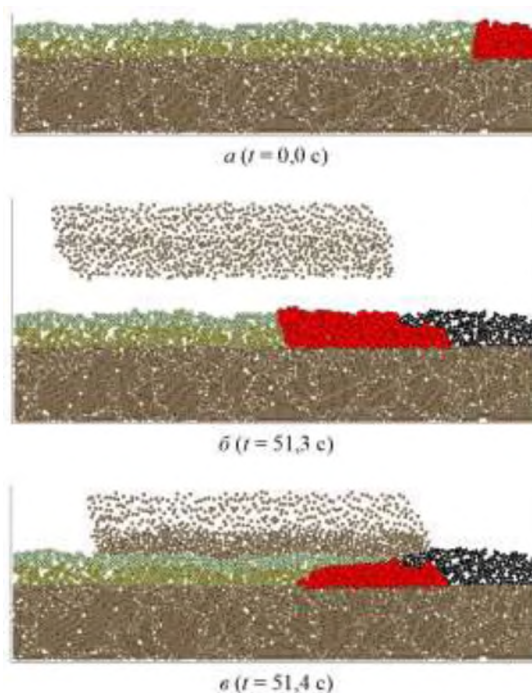


Рисунок 3.7 – Последовательность моделирования тушения лесного низового пожара в модели

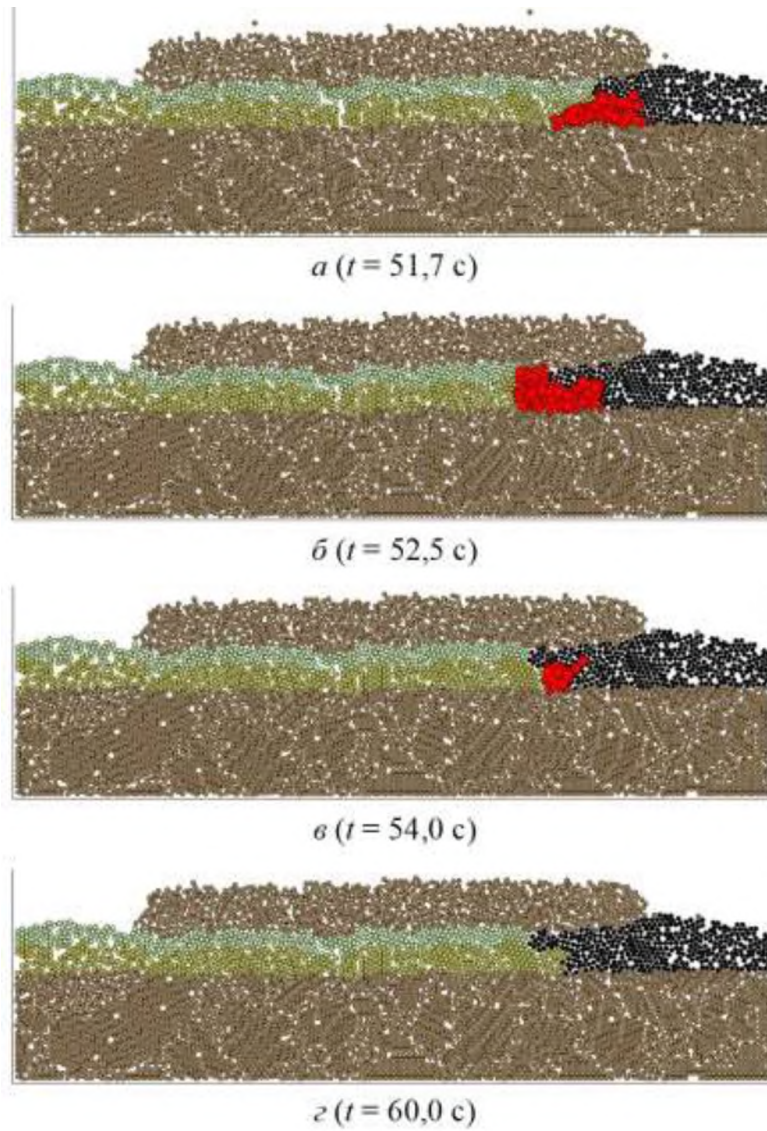


Рисунок 3.7 (Продолжение) – Последовательность моделирования тушения лесного низового пожара в модели

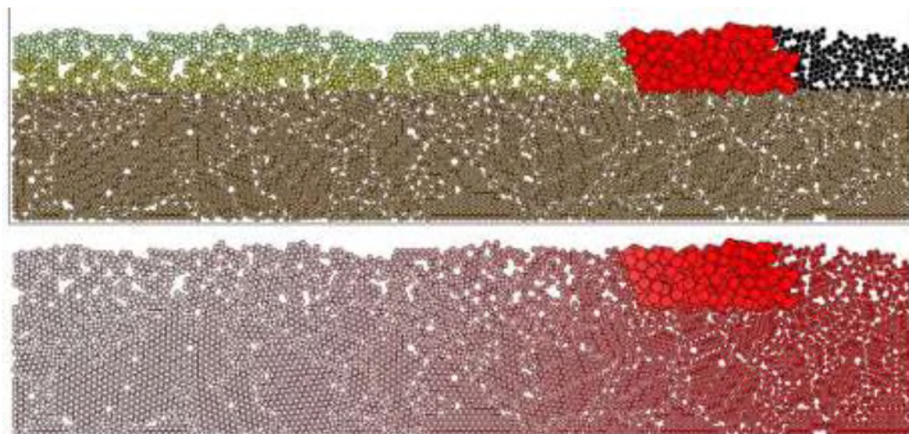


Рисунок 3.8 – Картограмма распределения температуры (внизу), соответствующая процессу движения фронта лесного пожара по лесной подстилке

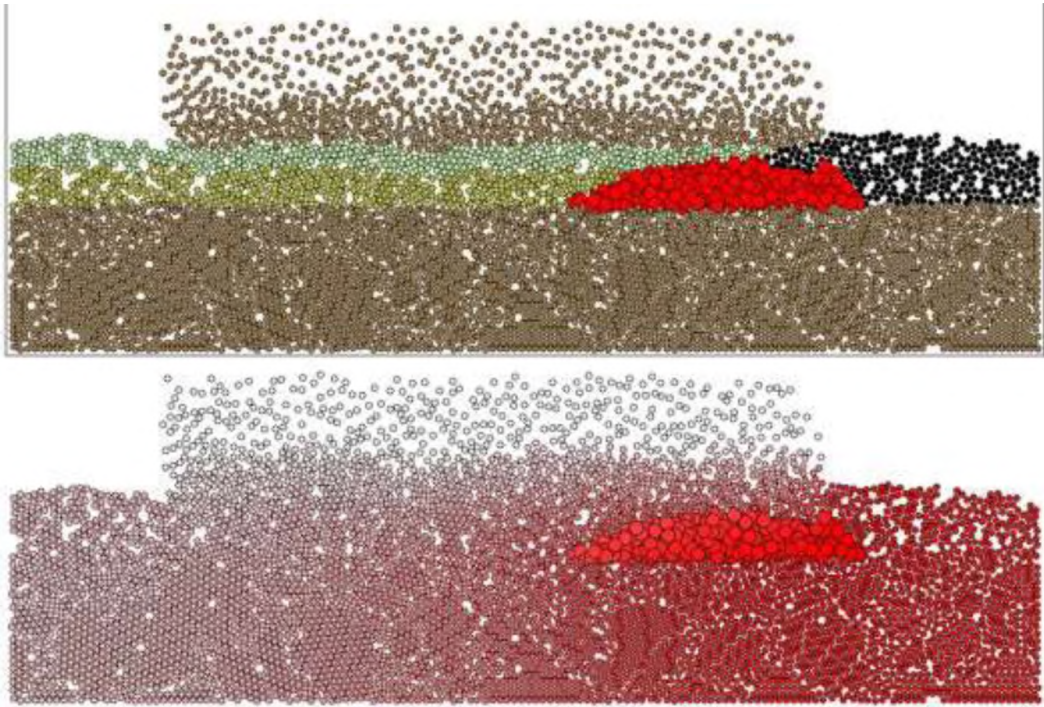


Рисунок 3.9 – Картограмма распределения температуры (внизу) в момент взаимодействия потока грунта с фронтом лесного пожара

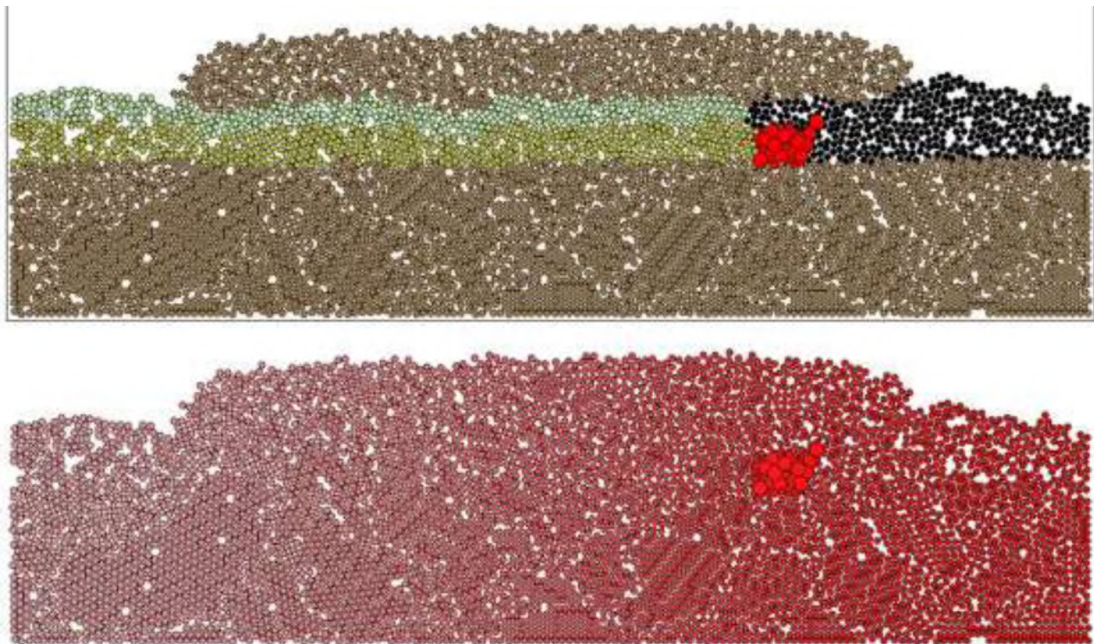


Рисунок 3.10 – Картограмма распределения температуры (внизу) в момент тушения лесного пожара

Составленная имитационная модель обладает высоким уровнем универсальности, что позволяет исследовать влияние большого количества

параметров грунтометательной машины, а также элементов среды, влияющих на эффективность тушения: грунта, лесной подстилки, лесного пожара (рисунок 3.11).

Параметры, входящие в состав основных в разработанной имитационной модели, возможно разграничить на четыре группы. Первую группу параметров составляют данные, описывающие поток грунта:

Q – поток грунта, кг/с;

v – скорость падения грунта на горящую лесную подстилку, м/с;

α – угол падения грунта на горящую лесную подстилку, градусы;

χ – коэффициент температуропроводности грунта, м²/с.

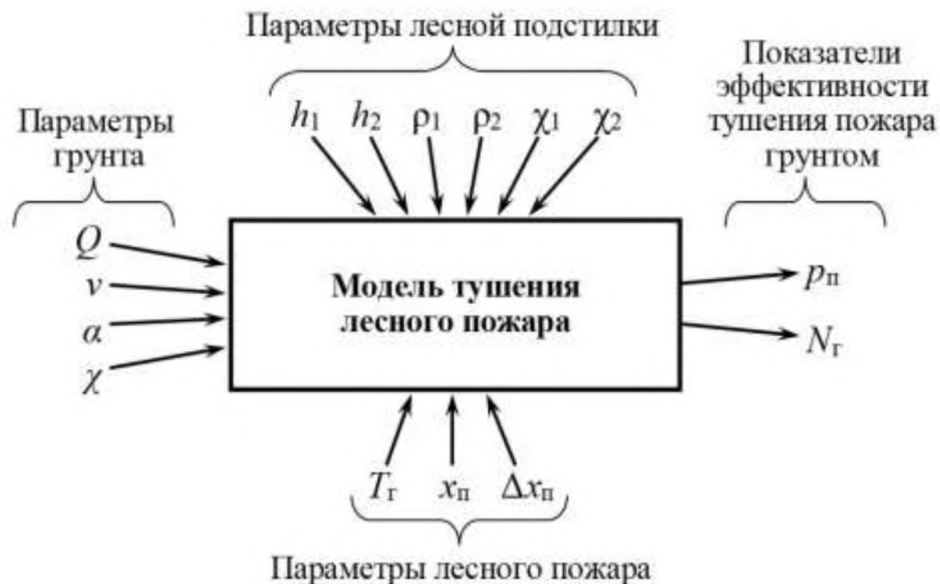


Рисунок 3.11 – Входные параметры имитационной модели и показатели эффективности тушения лесного пожара

Вторая группа входных переменных представляет собой параметры двухслойной лесной подстилки:

h_1 – высота нижнего слоя лесной подстилки, м;

h_2 – высота верхнего слоя лесной подстилки, м;

ρ_1 – плотность нижнего слоя лесной подстилки, кг/м³;

ρ_2 – плотность верхнего слоя лесной подстилки, кг/м³;

χ_1 – температуропроводность нижнего слоя лесной подстилки, $\text{м}^2/\text{с}$;

χ_2 – температуропроводность верхнего слоя лесной подстилки, $\text{м}^2/\text{с}$;

Помимо перечисленных параметров, модель позволяет изменять определенное количество параметров слоёв лесной подстилки, связанных с распространением лесного пожара: температуру лесного пожара, запас горючих веществ (биологического топлива) и др.

Третья группа входных переменных представляет собой параметры лесного пожара:

T – температура в зоне лесного пожара, К;

$x_{\text{п}}$ – координата начала зоны лесного пожара, м;

$\Delta x_{\text{п}}$ – ширина зоны лесного пожара, м.

Последняя группа переменных представляет собой показатели эффективности тушения лесного пожара:

$p_{\text{п}}$ – полнота тушения кромки лесного пожара (определяется как доля лесного низового пожара, погашенного поступившим фрагментом грунта при условии полного тушения лесного пожара $p_{\text{п}} = 1$);

$N_{\text{г}}$ – мощность грунтометательной машины, требуемая для формирования потока грунта с данными параметрами, Вт.

Дальнейшее теоретическое исследование заключается в поочередном изменении входных параметров и поиске диапазонов изменения входных параметров, при которых лесной пожар эффективно тушится (максимальное значение полноты тушения лесного пожара (приемлемое значение $p_{\text{п}} = 1$) и минимальные затраты мощности грунтометательной машины $N_{\text{г}}$).

3.5. Исследование параметров грунтометательной машины, оказывающие наибольшее влияние на эффективность тушения лесного пожара

Эффективность тушения лесного пожара грунтом может различаться в зависимости от величины объема грунта ($\text{кг}/\text{с}$), находящегося в потоке, подаваемом грунтометательной машиной. При малом объёме грунта

происходит покрытие лесной подстилки тонким слоем, что показывает недостаточную эффективность и сильно сниженное механическое воздействие на проявление лесного пожара (рисунок 3.12). Недостаточной для теплоотвода оказывается масса грунта. Поэтому лесная подстилка, присыпанная тонким слоем грунта (менее 5 см), продолжает гореть: фронт горения перемещается из-под насыпанного слоя грунта (рисунок 3.12).

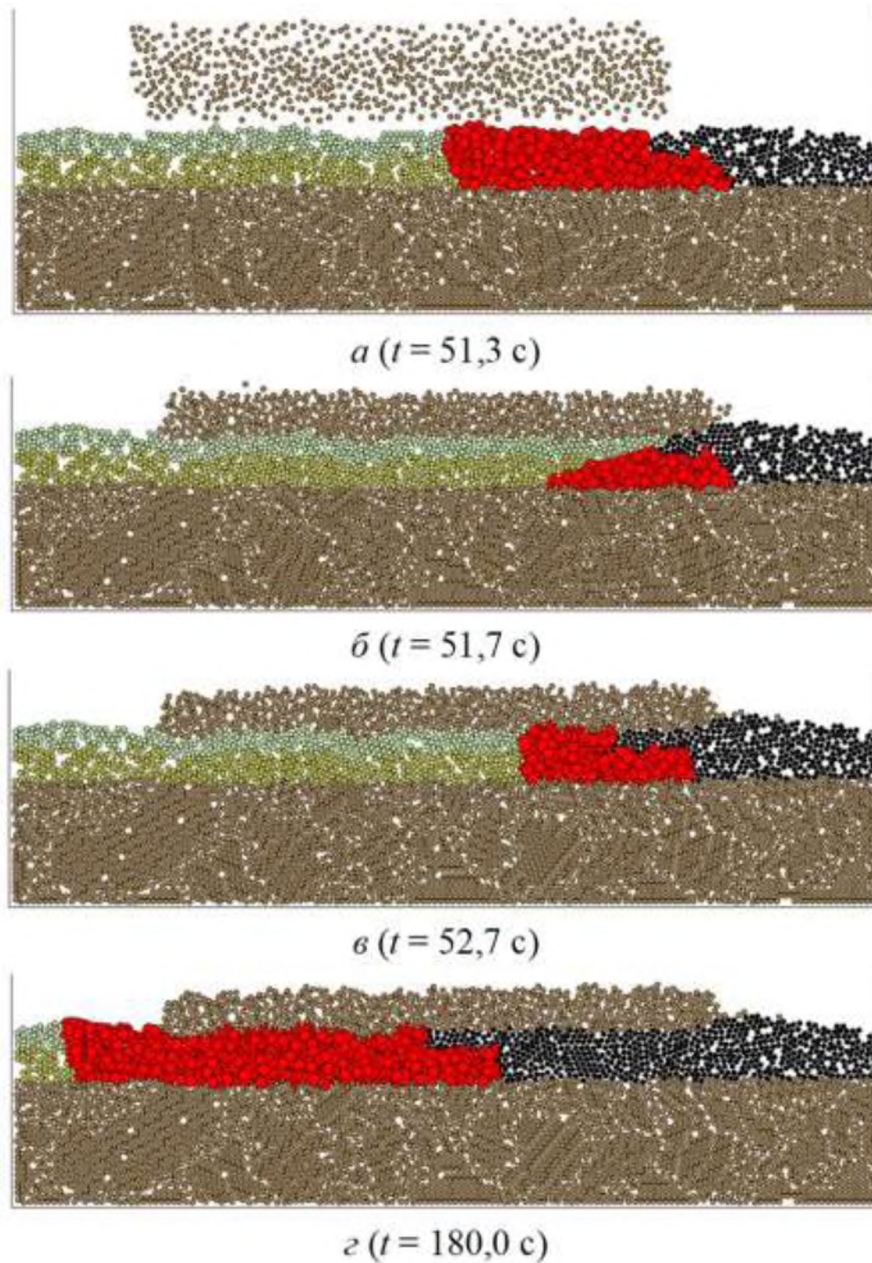


Рисунок 3.12 – Попытка тушения пожара малым объёмом грунта, не приведшая к остановке распространения лесного пожара

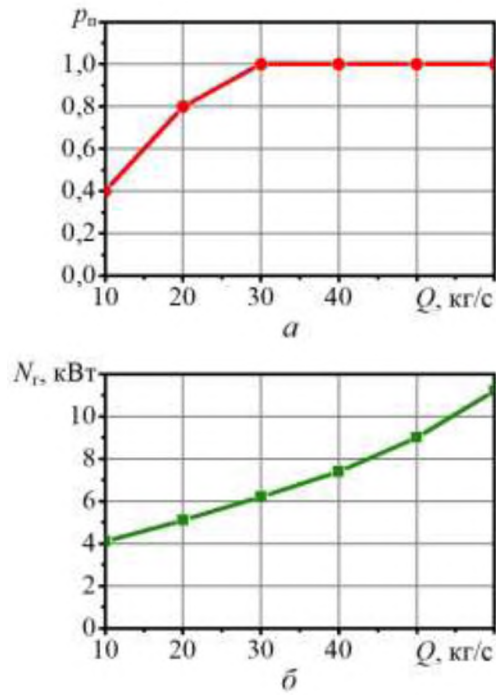


Рисунок 3.13 – Влияние потока грунта Q на полноту тушения лесного пожара p_{Π} и потребляемую грунтометательной машиной мощность N_{Γ}

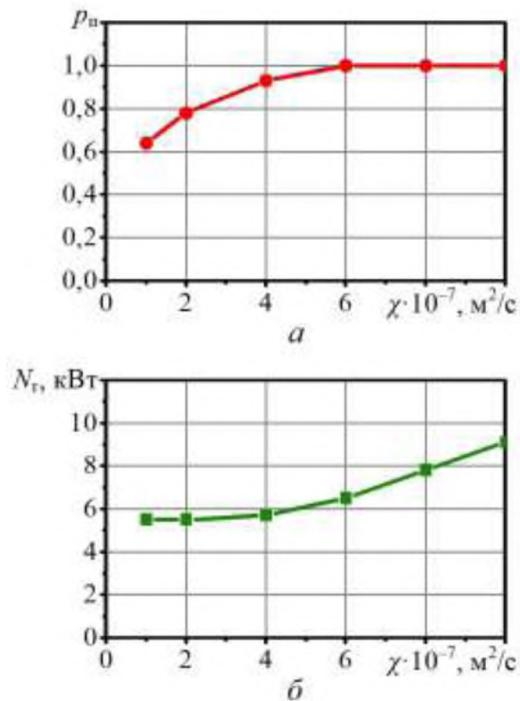


Рисунок 3.14 – Влияние температуропроводности грунта χ на полноту тушения лесного пожара p_{Π} и потребляемую грунтометательной машиной мощность N_{Γ}

Для тушения лесного пожара поток грунта должен составлять 30...50 кг/с, в этом случае обеспечиваются надежное тушение лесного пожара (рисунок 3.13) и минимальная требуемая для этого мощность метания грунта.

В зависимости от физико-механических свойств грунта может различаться эффективность тушения лесного пожара. Для надёжного тушения лесного пожара и низкой требуемой мощности для процесса вырезания, и метания порции грунта, он должен обладать температуропроводностью $6...10 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (рисунок 3.14).

3.6. Исследование влияния параметров лесного пожара на эффективность его тушения

В зависимости от ширины фронта горения лесной подстилки может оказаться недостаточной ширина формируемой полосы грунтометательной машиной. Как следует из рисунка 3.15, лесопожарная грунтометательная машина с базовыми настроечными параметрами эффективна при ширине фронта лесного низового пожара не более 0,6 м.

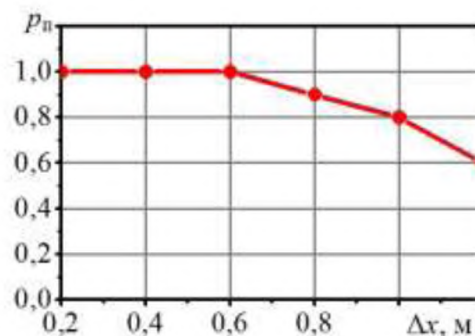


Рисунок 3.15 – Влияние ширины полосы лесного низового пожара Δx на полноту тушения $p_{\text{п}}$

3.7. Выводы

1. Разработана модель тушения лесного пожара потоком грунта, допускающая с высоким уровнем физической адекватности воспроизведение

процесса распространения лесного пожара в слоях лесной подстилки. Описывающая процесс механического воздействия потока порций грунта с проявлениями лесного пожара и перераспределение тепла между исследуемыми средами с возможностью графического представления результатов.

2. Разработана и составлена имитационная программа процесса тушения лесного пожара потоком грунта, позволяющая на основе серии компьютерных экспериментов определить, какие параметры оказывают наибольшее влияние на эффективность тушения лесного пожара, и определить их оптимальные диапазоны.

3. Поток грунта оказывает механическое воздействие на горящую лесную подстилку, сбивая проявление лесного пожара и тепловое воздействие, отбирая тепло у проявления лесного пожара в лесной подстилке, делая температуру ниже температуры возгорания среды. Процесс механического сбивания кромки лесного низового пожара сдвинут по времени от 2 до 20 с относительно процесса отбора тепла, протекающего позже. Результат тушения лесного пожара зависит от того, насколько успешно будет выполнена комбинация этих двух факторов процесса тушения лесного пожара.

4. Эффективность тушения лесного пожара достигается, когда поток грунта составляет от 30 до 50 кг/с, в этом случае обеспечивается высокая вероятность более 0,99 тушения лесного пожара и потребляемая грунтометательной машиной мощность не превышает 9,3 кВт. При потоке грунта 20 кг/с вероятность тушения лесного пожара составляет 0,79 при относительно низкой потребляемой грунтометательной машиной мощности 5,2 кВт.

5. Эффективность тушения пожара может быть различной в зависимости от вида грунта. Для надёжного тушения лесного пожара и низкой мощности метания грунт должен обладать температуропроводностью $(6-10) \cdot 10^{-7}$ м²/с. При этом вероятность тушения лесного пожара будет превышать 0,99, а потребляемая грунтометательной машиной мощность будет не более 9,1 кВт.

6. В зависимости от ширины фронта лесного пожара,двигающегося по лесной подстилке, может быть недостаточной ширина формируемой грунтометательной машиной полосы грунта. Грунтометательная машина с базовыми настроечными параметрами эффективна при ширине фронта лесного пожара не более 0,6 м, при этом обеспечивается вероятность тушения лесного пожара более 0,99. При увеличении ширины полосы грунта до 0,8 м вероятность тушения лесного пожара снижается до 0,91.

4. Разработка и исследование модели движения грунта в воздушной среде

4.1. Модель движения потока грунта в воздушной среде

Для проведения процесса имитационного моделирования движения потока грунта в воздушной среде выбран метод динамики частиц, который хорошо зарекомендовал себя при моделировании процесса тушения лесного пожара. Метод динамики частиц является математически-естественным методом описания движения одной среды (рассыпчатый грунт) и в другой (газ).

4.2. Методика моделирования представления воздуха и почвы

При детальном рассмотрении возможно увидеть сходство с описанием методики имитационного моделирования, лежащей в основе задания основных параметров, в том числе и перемещении элементов грунта в воздушном пространстве. Реализация моделирования произведена по второму закону Ньютона с описанием упруго-вязкого взаимодействия между частицами грунта и рабочих органов (рисунок 4.1).

Основное отличие методов моделирования тушения лесного пожара и движения грунта в воздухе заключается в необходимости моделирования газовой среды. Коэффициенты жёсткости взаимодействия и вязкого трения для газа существенно меньше (на 4-6 порядков), чем для твёрдых тел. В данной модели для определения коэффициентов использовались табличные данные о физических свойствах воздушной среды при температуре 300 К (27 °С).

В начальный момент времени пространство моделирования $L_x \times L_z$ прямоугольной формы заполнено плотноупакованными элементами одинакового диаметра. Данное плотноупакованное заполнение готовится предварительно, записывается в форму файла, и в начале моделирования вызывается из файла, чтобы сократить машинное время.

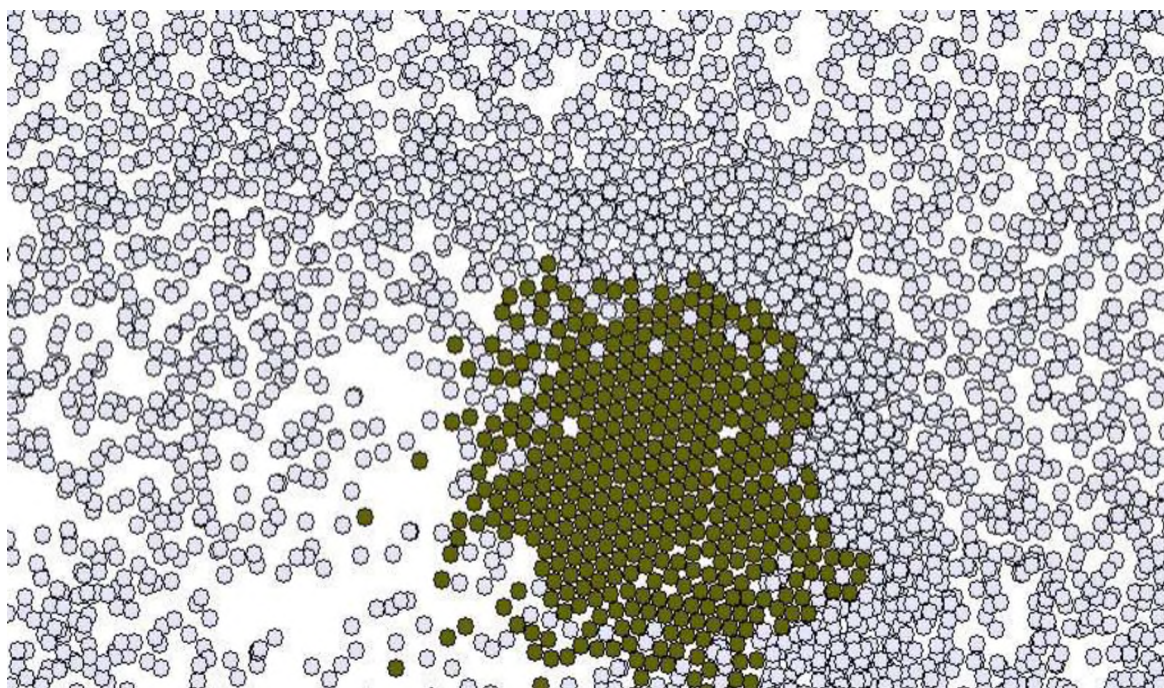


Рисунок 4.1 – Описание фрагмента грунта и воздушной среды как совокупности элементарных кругов, взаимодействующих между собой

Затем в исходной плотной упаковке элементов производится разделение элементов на два типа: грунт и воздушная среда. Определение типа осуществляется с помощью следующего неравенства

$$p_i = \begin{cases} 1, & \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{(x_i - x_{ц})^2 + (z_i - z_{ц})^2} < R_{\phi}; \\ F_i < s; \end{array} \right. \\ 2, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (4.1)$$

где p_i – тип элемента, принимающий значения 1 – грунт или 2 – воздушная среда;

x_i, z_i – координаты центра элемента, м;

$x_{ц}, y_{ц}$ – начальные координаты центра фрагмента грунта в приближении круглой формы, м;

R_{ϕ} – радиус фрагмента грунта, м;

F_i – последовательные реализации случайной величины, распределённой по равномерному закону в интервале 0 - 1;

s – параметр сплошности фрагмента грунта.

Данная формула задаёт равномерное распределение элементов грунта в области круговой формы с заданной степенью сплошности s (через сплошность может быть выражен параметр рассыпчатости как $1 - s$). Примеры начального состояния грунта с различной сплошностью представлены на рисунке 4.3. Более естественным является не постоянная сплошность s в пределах фрагмента грунта, а градиентная: сплошность фрагмента выше в центре и уменьшается к краям (рисунок 4.3, л). Такой фрагмент с градиентным распределением сплошности задаётся следующим неравенством

$$p_i = \begin{cases} 1, & \begin{cases} \sqrt{(x_i - x_y)^2 + (z_i - z_y)^2} < R_\phi; \\ F_i < s_1 + (s_2 - s_1) \frac{\sqrt{(x_i - x_y)^2 + (z_i - z_y)^2}}{R_\phi}; \end{cases} \\ 2, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (4.2)$$

где s_1 и s_2 – параметры сплошности в центре и у границы круговой области.

При движении фрагмента грунта в воздушной среде отдельные его элементы могут отделяться от основной связанной совокупности элементов, то есть модель позволяет воспроизводить существенное изменение конфигурации фрагмента грунта в воздухе. Чем более «сплошной» изначальный фрагмент и чем больший коэффициент ограничения взаимодействия упругими силами, тем лучше фрагмент грунта сохраняет исходную форму при движении. Для количественной оценки эффекта рассыпания фрагмента грунта в воздухе используются следующие два основных показателя. Дисперсия (рассеяние) элементов по абсолютному значению вектора скорости Δv оценивается как среднеквадратичное отклонение скоростей отдельных элементов

$$\Delta v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{э}1}} \left(\sqrt{v_{xi}^2 + v_{zi}^2} - \frac{1}{N_{\text{э}1}} \sum_{j=1}^{N_{\text{э}1}} \sqrt{v_{xj}^2 + v_{zj}^2} \right)^2}{N_{\text{э}1}}}, \quad (4.3)$$

где i и j – индексы перебора элементов типа «грунт»;

$N_{\text{э}1}$ – количество элементов типа «грунт» (тип 1);

v_{xi} , v_{zi} – декартовы компоненты вектора скорости элемента грунта, м/с.

Дисперсия (рассеяние) элементов по углам (направлению вектора скорости) $\Delta\varphi$ оценивается как среднеквадратичное отклонение текущего угла полета элементов

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{эл}}} \left(\text{Arctg} \frac{v_{zi}}{v_{xi}} - \frac{1}{N_{\text{эл}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{эл}}} \text{Arctg} \frac{v_{zi}}{v_{xi}} \right)^2}{N_{\text{эл}}}}, \quad (4.4)$$

где Arctg (с большой буквы) – тригонометрическая функция arctg с удвоенным периодом

$$\text{Arctg} \frac{b}{a} = \begin{cases} \text{arctg} \frac{b}{a}, & a \geq 0; \\ \text{arctg} \frac{b}{a} + \pi, & a < 0, \end{cases} \quad (4.5)$$

где a и b – в данном случае декартовы переменные x и z .

Помимо дисперсий скоростей и углов полёта Δv и $\Delta\varphi$ в качестве показателей эффективности используются ещё три переменные, характеризующие процесс приземления грунта и работу грунтометательной машины. Средняя скорость v_L элементов грунта при достижении поверхности на заданном расстоянии метания L рассчитывается следующим образом.

$$v_L = \frac{1}{N_{\text{эл}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{эл}}} \sqrt{v_{xj}^2(z_i = z_n + h_k) + v_{zj}^2(z_i = z_n + h_k)}, \quad (4.6)$$

где z_i – декартова координата элемента, м;

$z_{\text{п}}$ – вертикальная координата лесной поверхности, м;

h_k – ширина полосы над лесной поверхностью, в которой элемент считается контактирующим с лесной поверхностью, м.

Показатель рассеяния потока грунта l_p , в данном случае выраженный как ширина полосы на поверхности, на которую оседает 90 % грунта, рассчитывается как

$$l_p = \left(\max x_i - \min x_i \right) \begin{cases} z_i < z_n + h_k \\ 0,9N_{\text{эл}} > \sum_{j=1}^{N_{\text{эл}}} \begin{cases} 1, & \min x_i < x_j < \max x_i; \\ 0, & \begin{cases} x_j \leq \min x_i; \\ x_j \geq \max x_i. \end{cases} \end{cases} \end{cases} \quad (4.7)$$

Мощность, потребляемая грунтометательной машиной N_r для формирования потока грунта с данными параметрами, рассчитывается следующим образом

$$N_z = \frac{v_z}{\Delta y} \cdot \frac{m_{\text{эл}}}{2} \sum_{i=1}^{N_{\text{эл}}} \sqrt{v_{xi}^2 + v_{zi}^2}, \quad (4.8)$$

где v_r – скорость движения грунтометательной машины в направлении Y , условно перпендикулярном плоскости моделирования XZ , м/с;

Δy – условная толщина двумерного слоя, вырезанного из трёхмерного пространства, м;

$m_{\text{эл}}$ – масса элемента типа «грунт» (тип 1), кг.

В процессе научного исследования составлено программное обеспечение, позволяющие проводить компьютерные эксперименты с отображением результатов по движению фракций грунта в воздушной среде [40, 70, 88].

Программа позволяет с высокой физической адекватностью описать фрагментацию грунта в полете и аэродинамические процессы в воздушной среде в рамках метода динамики частиц. Разработанная для научного исследования программа позволяет изменять геометрические и физические характеристики потока грунта и условия, в которых проводится имитационное исследование. Программа отображает на экране вертикальный срез системы и графики зависимостей от времени среднего расстояния между фрагментами и средней силы сопротивления воздушной среды (рисунок 4.2).

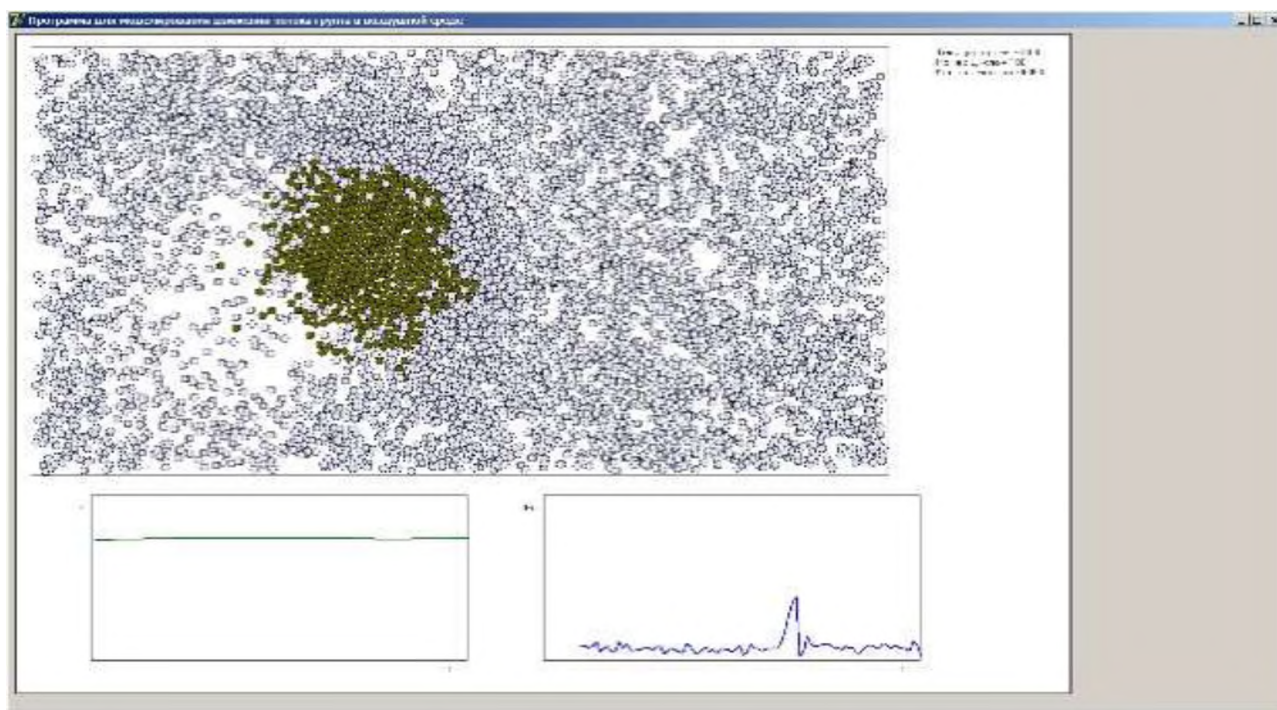


Рисунок 4.2 – Интерфейсная форма вывода результатов моделирования движения грунта в воздушной среде: вертикального среза системы фрагментов грунта и воздуха, графиков зависимостей от времени среднего расстояния между элементами грунта и средней силы сопротивления воздушной среды

Программа применима для изучения эффективности тушения лесных пожаров потоком грунта, а также других задач, связанных с движением фрагментируемых сред в воздухе.

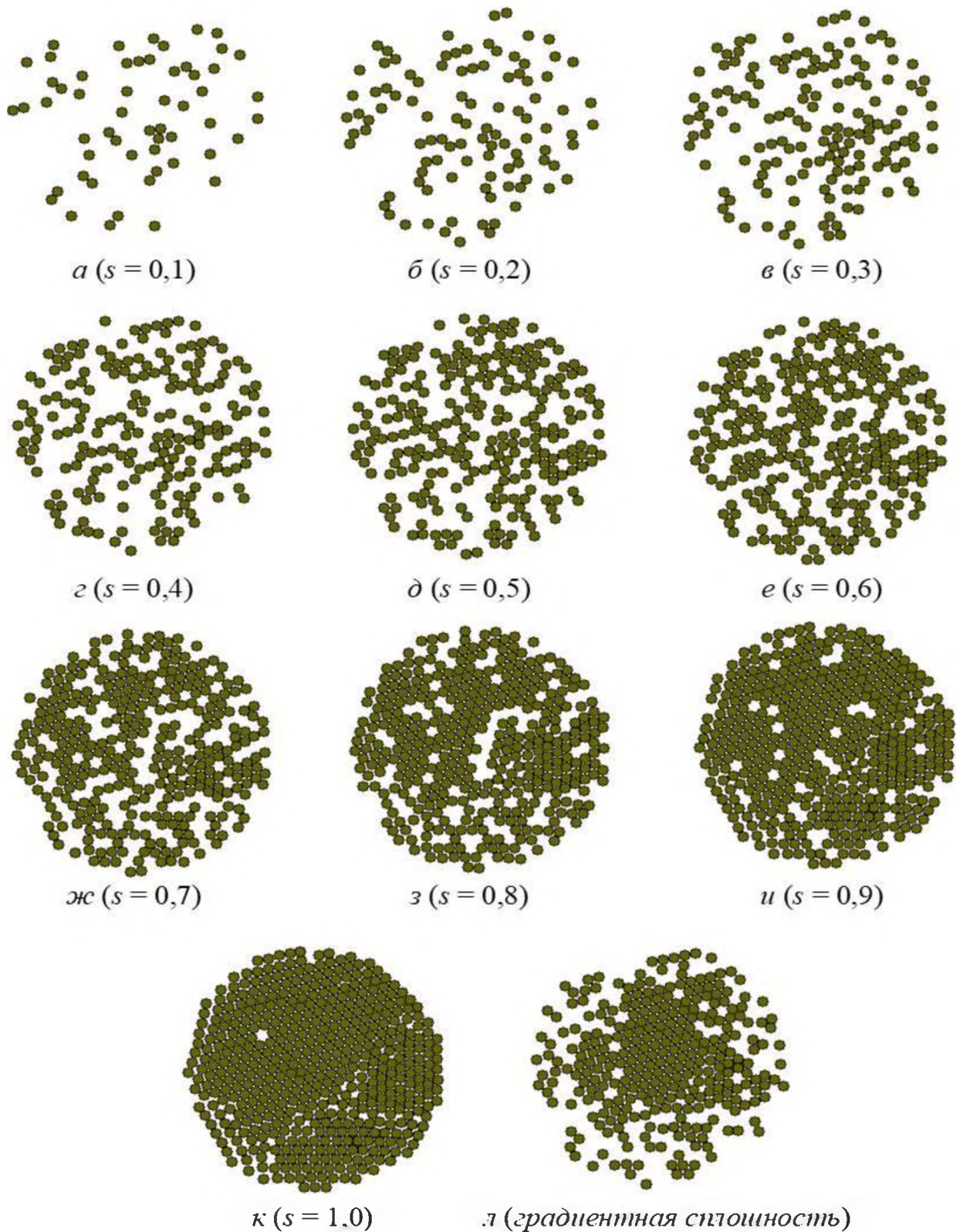


Рисунок 4.3 – Представление в модели исходного состояния потока грунта для случаев различной сплошности s

Как видно из рисунка 4.3, модель на качественном уровне вполне физически адекватно описывает движение фрагмента грунта: воспроизводятся

тормозящее действие воздушной среды, рассеивающее действие, отделяющее фрагменты грунта.

Модель позволяет воспроизвести различную начальную связность потока грунта: от пыли до полностью сплошных комков грунта, а также градиентное изменение связности внутри фрагмента грунта.

4.3. Исследование на основе модели процесса движения грунта в воздушной среде

Вследствие высокого уровня универсальности разработанной модели движение грунта в воздушной среде появляется возможность исследовать влияние большого количества параметров потока грунта и воздушной среды на показатели качества формирования направленного потока грунта (рисунок 4.4).

К первой группе входных переменных относятся параметры потока грунта:

Q – поток грунта, м/с;

ρ – плотность (связность, рассыпчатость) потока грунта, кг/м³;

v – начальная скорость движения фрагмента грунта, м/с;

α – начальный угол полёта фрагмента грунта, градусы.

Вторая группа входных переменных представляет собой параметры воздушной среды:

T – температура воздуха, К;

W – влажность воздуха, %;

v_B – скорость горизонтального перемещения воздушной среды (скорость ветра), м/с.

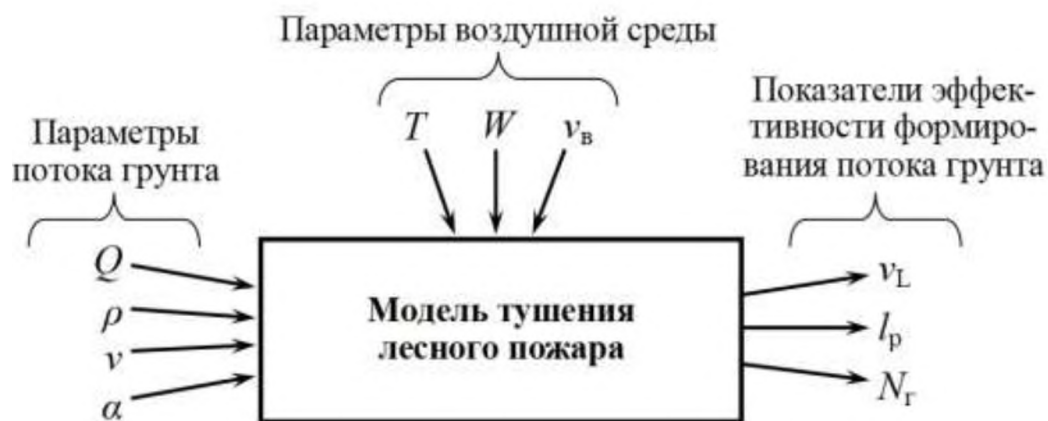


Рисунок 4.4 – Входные параметры модели движения грунта в воздушной среде и показатели эффективности формирования потока грунта для тушения лесного пожара

Последняя группа переменных представляет собой показатели эффективности формирования потока грунта:

v_L – средняя скорость элементов грунта при достижении поверхности на заданном расстоянии метания L , м/с;

l_p – показатель рассеяния потока грунта, в данном случае выраженный как ширина полосы на поверхности, на которую оседает 90 % грунта, м;

N_r – мощность, потребляемая грунтометательной машиной для формирования потока грунта с данными параметрами, Вт.

Дальнейшее теоретическое исследование заключается в поочередном изменении входных параметров и поиске диапазонов изменения входных параметров, в которых формируется эффективный поток грунта. То есть его максимальная скорость v_L контакта с поверхностью, и минимальная ширина полосы рассеяния l_p , а также минимальная мощность, потребляемая грунтометательной машиной N_r .

4.4. Исследование воздействия характеристик потока грунта на характер его движения в воздушной среде

Исходная связность фрагмента грунта оказывает существенное влияние на характер его движения. В случае движения связного или несвязного, но плотно собранного фрагмента грунта, наблюдается большая дальность полёта и минимальное рассеяние потока по скоростям и углам (рисунок 4.5). В случае движения рассыпчатого грунта он существенно замедляется воздушной средой, происходит его рассеяние по скоростям и углам (рисунок 4.6, 4.7).

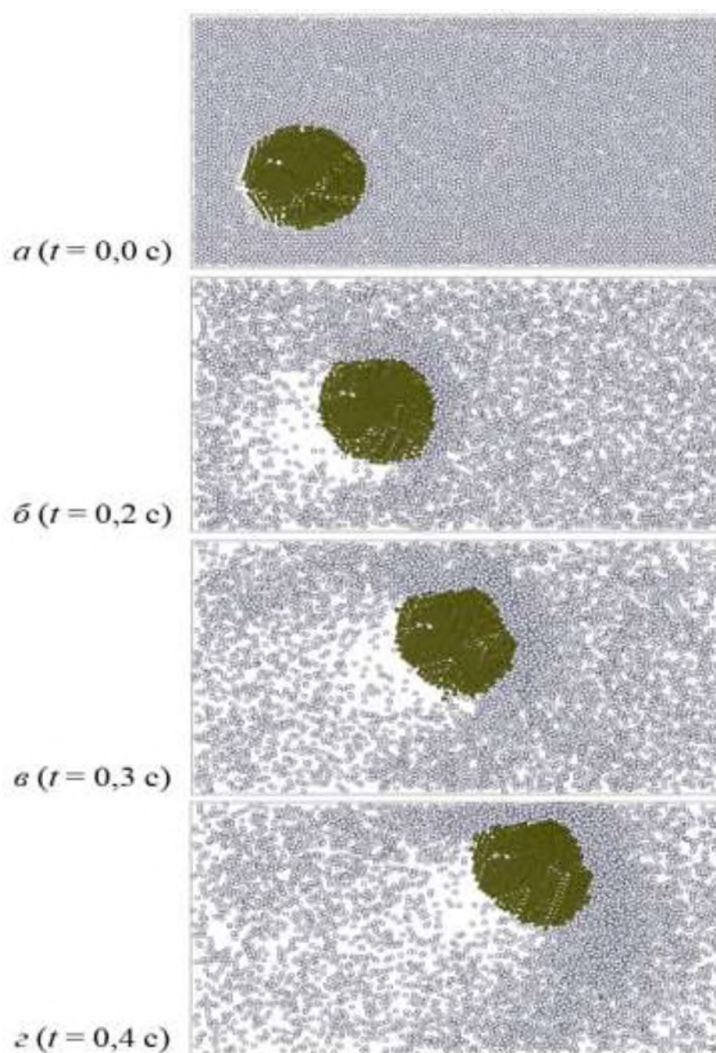


Рисунок 4.5 – Изменение состояния потока грунта на начальном этапе полёта для сплошности $s = 1,0$

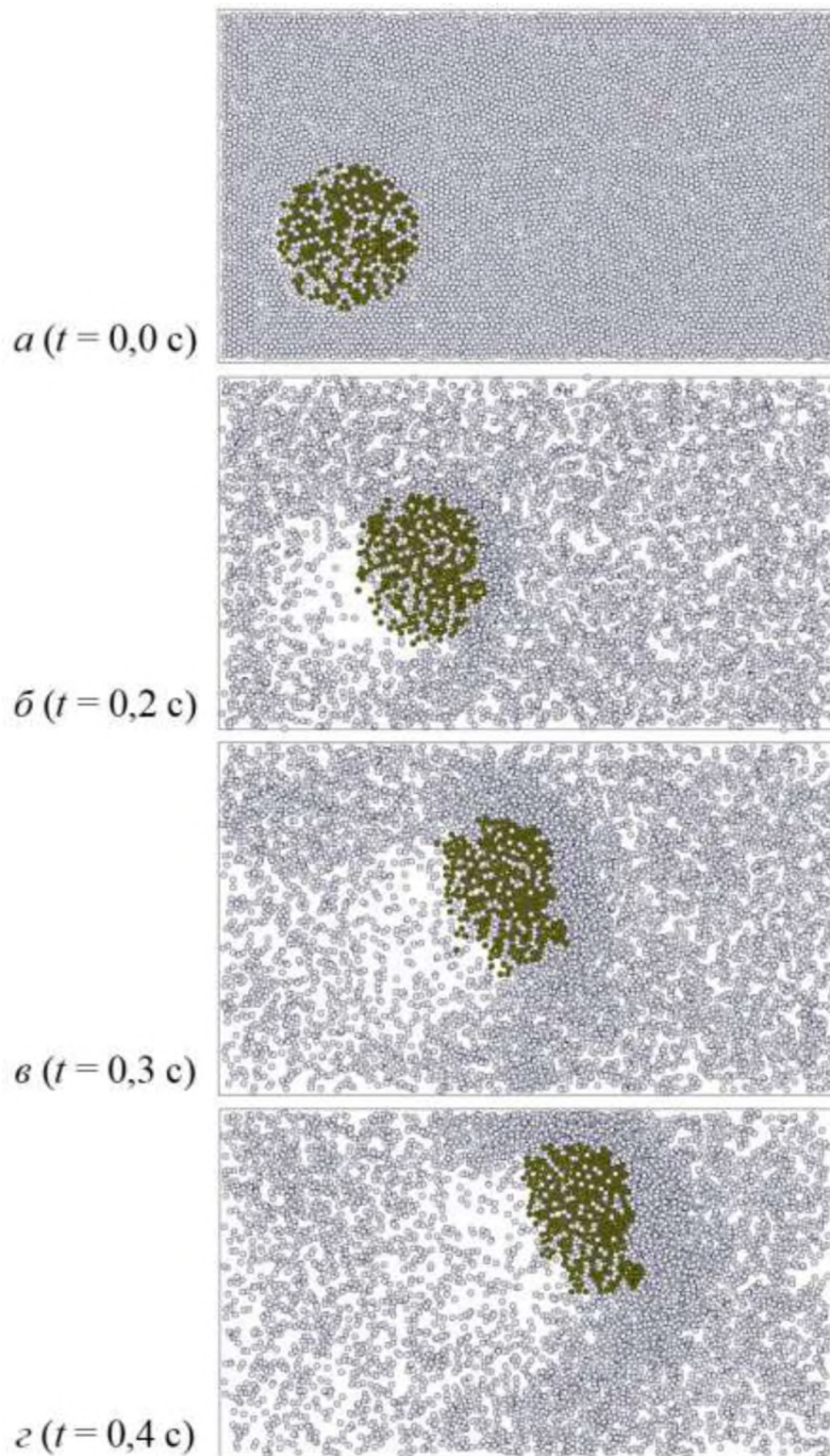


Рисунок 4.6 – Изменение состояния потока грунта на начальном этапе полёта для сплошности $s = 0,6$

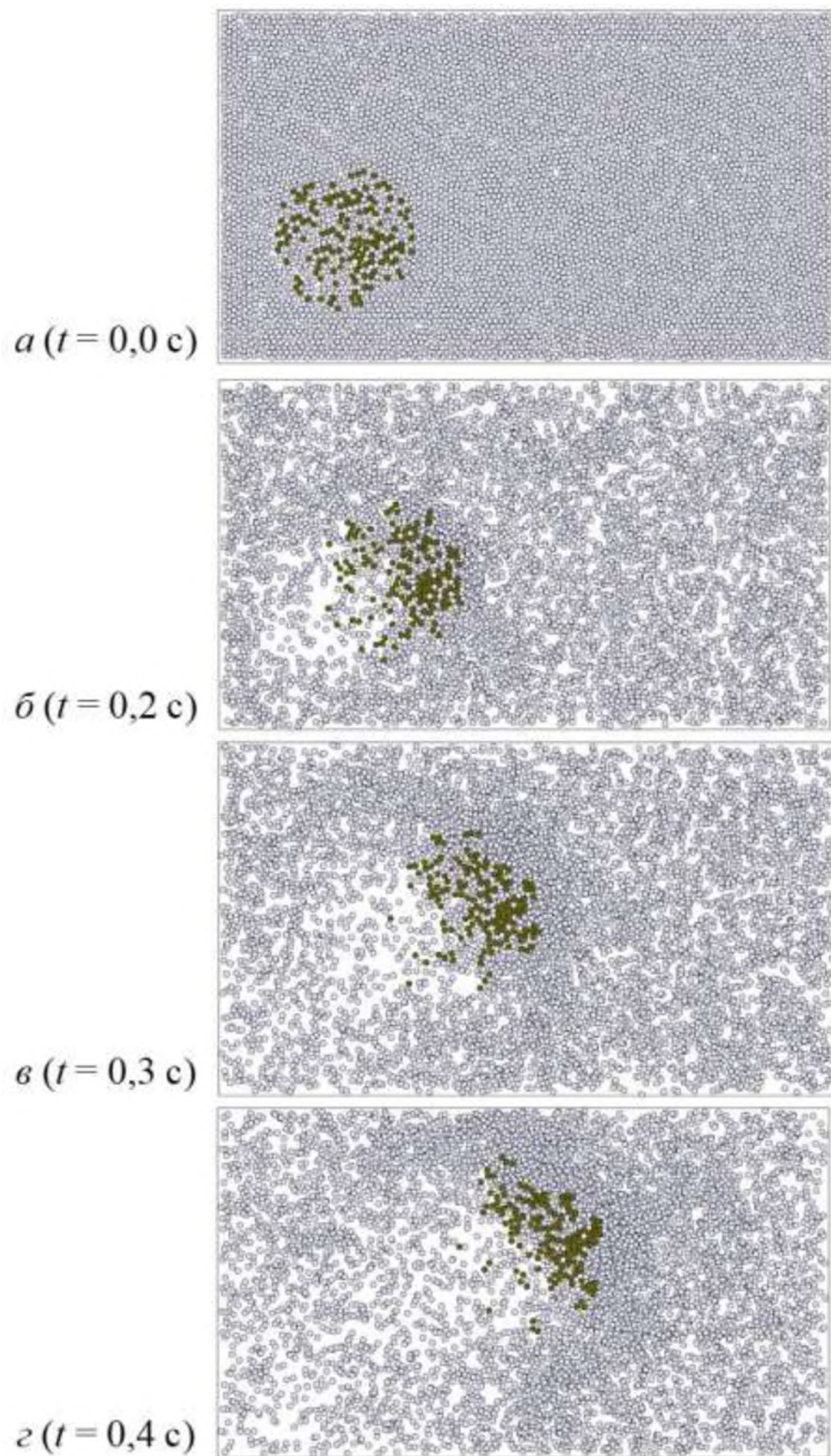


Рисунок 4.7 – Изменение состояния потока грунта на начальном этапе полёта для сплошности $s = 0,3$

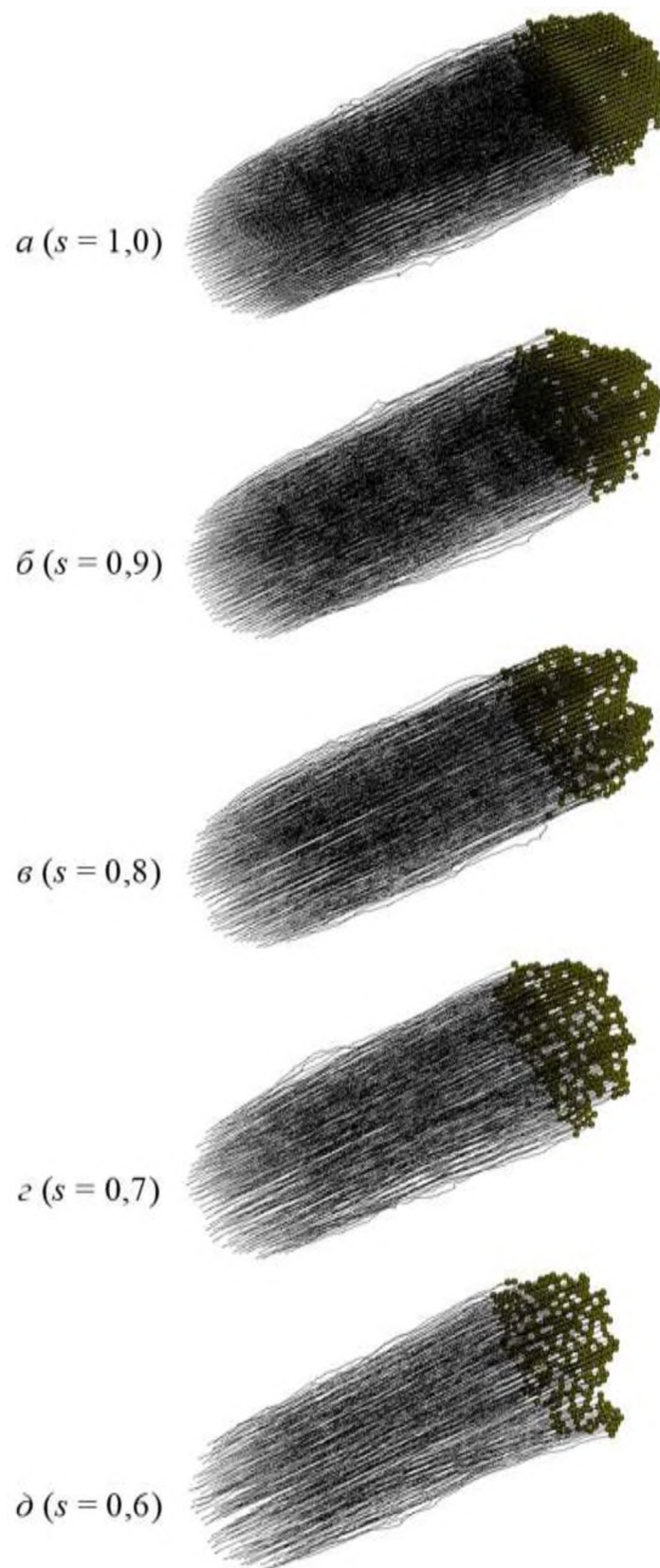


Рисунок 4.8 – Траектории движения частиц потока грунта с различной исходной сплошностью s (от 0,6 до 1,0) на начальном участке полёта

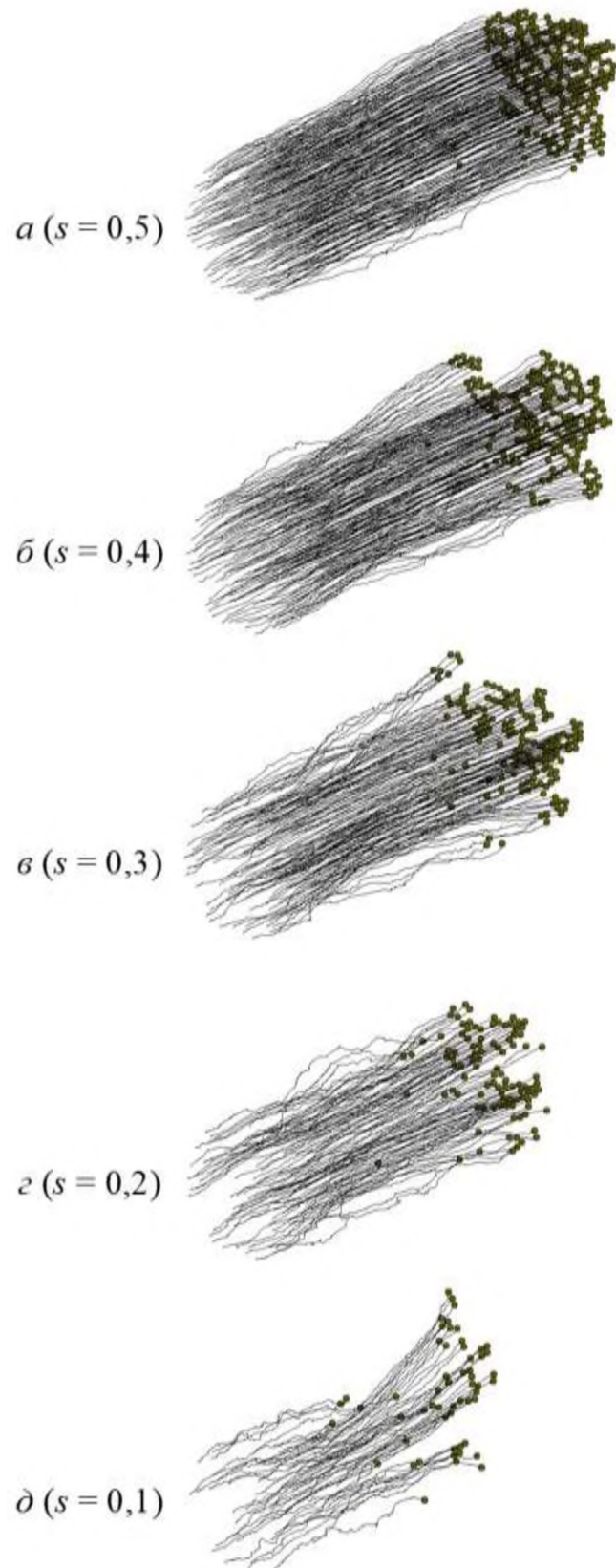


Рисунок 4.9 – Траектории движения частиц потока грунта с различной исходной плотностью s (от 0,1 до 0,5) на начальном участке полёта

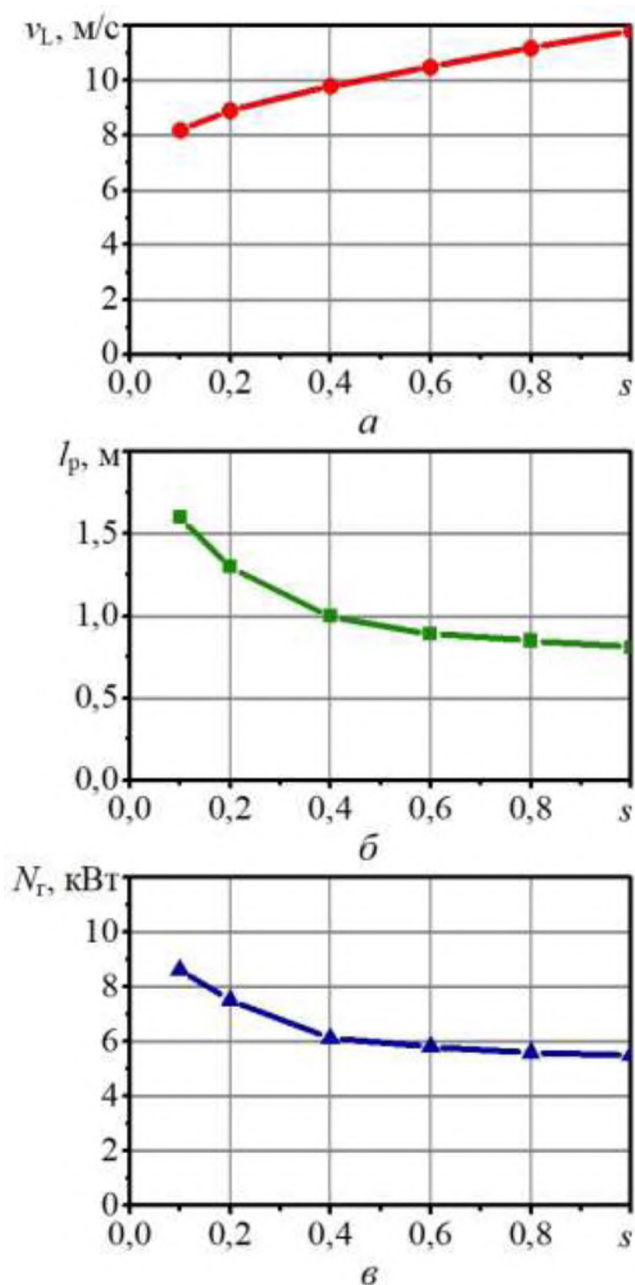


Рисунок 4.10 – Влияние плотности s на среднюю скорость потока грунта при достижении поверхности v_L (а), показатель рассеяния потока грунта I_p (б), потребляемую грунтометательной машиной мощность N_r (в)

Рассеяние по абсолютной и угловой величинам вектора скорости особенно наглядно прослеживается по траекториям движения элементов. В случае движения фрагмента с высокой плотностью траектории всех элементов практически параллельны и практически одинаковой длины (рисунок 4.8). В случае движения фрагмента грунта с низкой плотностью

траектории элементов оказываются разной длины, что свидетельствует о дисперсии скоростей частиц, и дисперсии потока по углам, под разными углами (рисунок 4.9).

Более точно влияние сплошности можно установить по количественным характеристикам качества формирования потока (рисунок 4.10). Сопоставляя графики, можно определить, что грунтометательная машина должна обеспечивать сплошность потока не менее 0,7. В этом случае скорость потока будет достаточно высока для сбивания кромки лесного низового пожара, более 11 м/с, ширина формируемой полосы грунта будет составлять менее 0,9 м, потребляемая мощность грунтометательной машиной будет составлять менее 6 кВт.

4.5. Исследование входа потока грунта в область нагретого воздуха

По мере приближения потока грунта к зоне горения температура воздуха повышается. Повышение очень существенно изменяет свойства воздуха. Если в обычном состоянии абсолютная температура воздуха принята 300 К, вблизи зоны горения воздух нагревается до ориентировочно 600 К, что вдвое выше.

С точки зрения термодинамики удвоение температуры приводит к изменению в два раза ряда свойств воздуха, например, давления в замкнутом объёме, внутренней энергии и т.п.

Поэтому проведено исследование перехода потока грунта из воздуха обычной температуры 300 К в область нагретого воздуха 600 К (рисунок 4.11). Обнаружено, что при входе потока грунта в область нагретого воздуха существенно увеличивается рассеяние элементов грунта по скоростям и углам (рисунок 4.12). Данное дополнительное рассеяние на заключительном этапе полёта необходимо учитывать при создании потока грунта грунтометательной машиной.

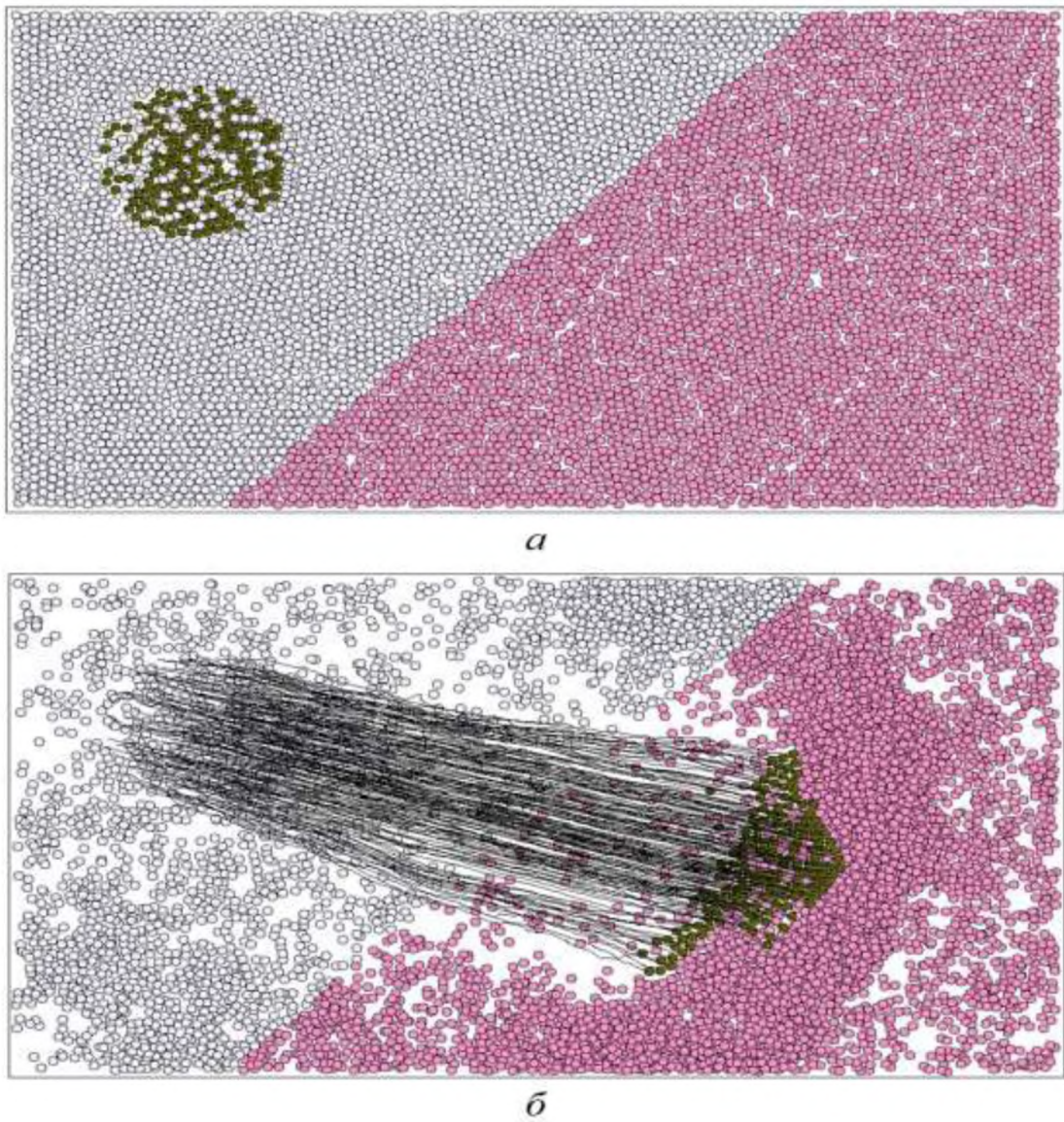


Рисунок 4.11 – Разделение воздуха на имеющий обычную температуру 300 К и нагретый воздух с температурой 600 К (*a*) и увеличение рассеяния элементов потока грунта по скоростям и углам при входе в область нагретого воздуха (*b*)

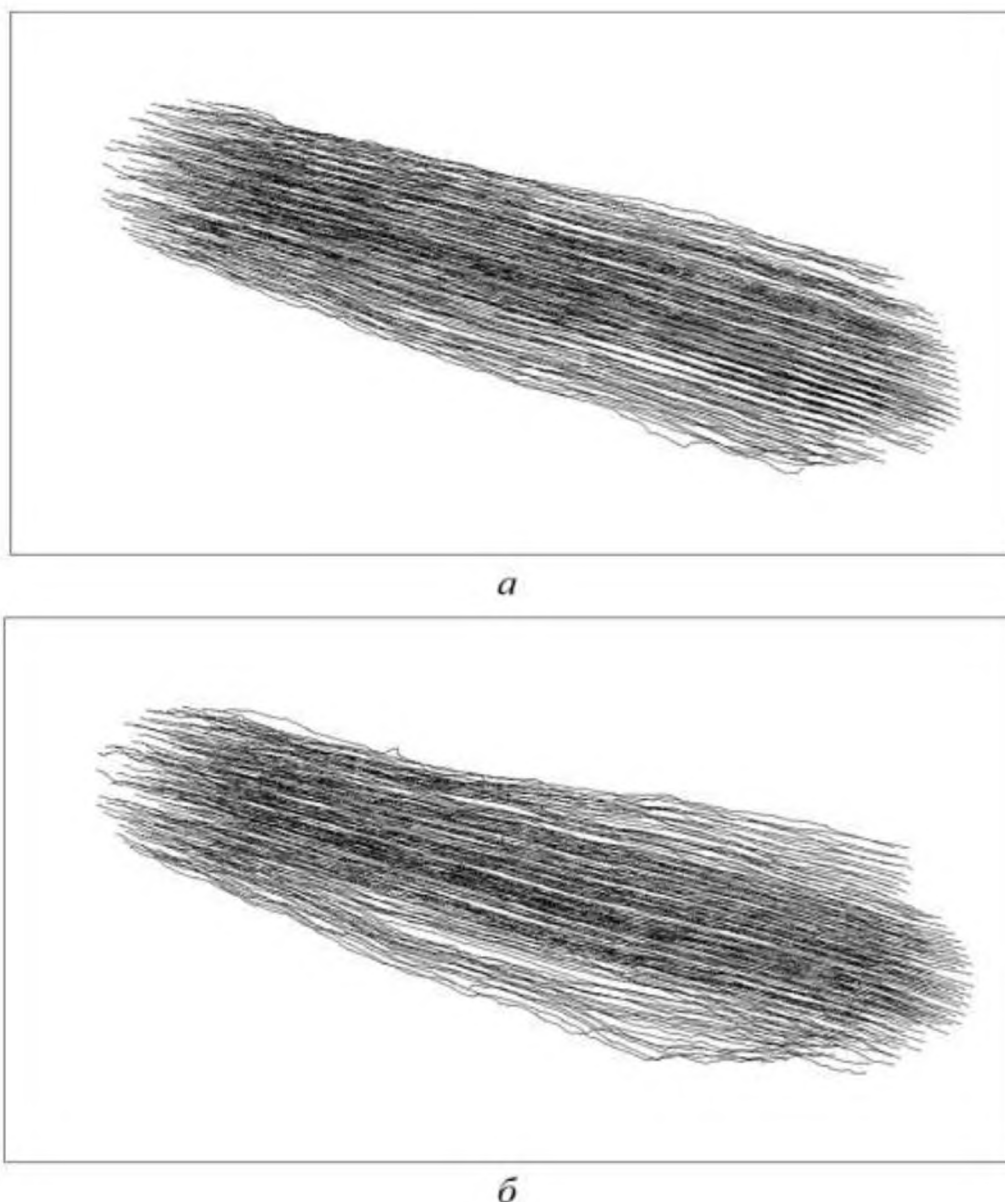


Рисунок 4.12 – Траектории движения элементов потока грунта в воздухе обычной температуры 300 К (*a*) и в воздухе, разделенном границей на обычный 300 К и нагретый 600 К (*б*)

4.6. Выводы

1. Разработана модель движения потока грунта в воздушной среде, учитывающая рассыпчатость грунта и позволяющая определить дисперсию потока по абсолютному и угловому значениям вектора скорости.
2. Создана имитационная программа движения потока грунта в

воздушной среде, позволяющая по сериям экспериментальных данных установить влияние параметров потока грунта и воздушной среды на показатели пригодности потока грунта для тушения лесного низового пожара.

3. Исходная связность фрагмента грунта оказывает существенное влияние на характер его движения. В случае движения связного или не связного, но плотно собранного фрагмента грунта (коэффициент сплошности равен 1,0) оказываются высокой дальность полёта (более 15 м) и минимальным рассеяние потока по скоростям (менее 1,4 м/с) и углам (менее 8°).

4. В случае движения рассыпчатого грунта с коэффициентом сплошности менее 0,6 он существенно замедляется воздушной средой, скорость достижения поверхности снижается с 11,8 для сплошного потока до менее 10,3 м/с. Происходит существенное рассеяние по скоростям (более 2,8 м/с) и углам (более 17°).

5. Грунтометательная машина должна обеспечивать сплошность потока не менее 0,7. В этом случае скорость потока будет достаточно высока для сбивания кромки лесного низового пожара, более 11 м/с при достижении поверхности, ширина формируемой полосы грунта будет составлять менее 0,9 м, потребляемая мощность грунтометательной машиной будет составлять менее 6 кВт.

6. При использовании для тушения лесного пожара рассыпчатого грунта с коэффициентом сплошности 0,2-0,5 (например, для песчаной и супесчаной лесной почвы) обеспечиваются относительно низкие показатели кучности потока грунта с расстояния тушения лесного пожара 15 м: скорость достижения поверхности 8,8-10,1 м/с, ширина полосы грунта увеличивается до 0,95-1,27 м, потребляемая мощность составляет 6,0-7,6 кВт, рассеяние потока по скоростям составляет 2,9-3,9 м/с, рассеяние потока по углам составляет 19-24°. Поэтому для достижения необходимой кучности потока необходимо приближать грунтометательную машину на более близкое расстояние к кромке лесного низового пожара (около 10-11 м).

5. Исследование процесса качественных показателей движения грунта в воздушном пространстве

Для проведения научных исследований по установлению показателей потока грунта, направляемого грунтометательными машинами, в рамках научно-технического развития для высокоточной оценки выбран подход оптического распознавания с возможностью проведения измерений. Сделанные в процессе полевых экспериментов видеозаписи позволили получить детализированную информацию о процессе перемещения потока грунта в воздушном пространстве при различных вариантах установленных значений регулировки. Технические возможности с учетом наличия видеозаписи процесса позволили получить изображение в разрешении 1920 x 1080 и более, при частоте кадров 30 кадров/с.

Установлены показатели потока грунта, формируемого базовым вариантом грунтометательной машины, по видеозаписям, которые получены в ходе проведения полевого экспериментального исследования.

В рамках данного раздела поставлены следующие задачи:

- проверить пять основных методов оптического распознавания, которые обладают повышенной вероятностью для отделения перемещающегося в воздухе потока грунта от посторонних объектов, присутствующих в кадре, например, деревья, трава и т.д. и сделать высокое пространственное разрешение фиксации процесса;

- составить математический аппарат, при помощи которого произвести требуемые расчеты по полученным изображениям потока грунта;

- разработать компьютерную программу для автоматизированной обработки массива кадров видеозаписей и определения статистическо-геометрических характеристик потока грунта;

- определить характеристики потока грунта, формируемого базовой грунтометательной машиной: картограммы и эпюры распределения плотности

и скорости потока в вертикальной и горизонтальной плоскости.

Поиск эффективного метода оптического выделения потока грунта от фона на кадрах видеоряда.

В процессе исследования были проверены пять основных методов оптического распознавания. Такой подход позволил определить эффективный метод для решения поставленных задач исследования.

На рисунке 5.1 представлен кадр из видеозаписи, полученной в процессе экспериментального исследования.



Рисунок 5.1 – Кадр из видеозаписи экспериментального исследования

В процессе выполнения задачи были выявлены основные сложности, связанные:

- с недостаточно высокой цветовой насыщенностью видеоряда изображения, преобладание серого оттенка;
- со сложной структурой заднего слоя изображения, состоящей из веток и стволов деревьев, находящихся в движении из-за ветра, затрудняющей процедуру и корректность получаемых результатов;
- с высокой скоростью движения в воздушном потоке частиц грунта и

потока в целом;

- с движением МТА «от нас», при этом необходимо провести корректировку при межкадровом усреднении.

Для более краткого изложения материала в данном разделе не приводится математический аппарат. Его можно найти в исходном коде компьютерной программы.

5.1. Исследование метода для определения характеристик потока грунта в воздушном пространстве

Обнаружено, что разделение видеок кадров по цветам является довольно эффективным методом выделения изображения грунта от фона. На рисунке 5.2 приведен пример видеок кадра с увеличенной насыщенностью цвета.



Рисунок 5.2 – При увеличении цветовой насыщенности на изображении относительно хорошо выделяются поток грунта (коричневый цвет), трактор (синий цвет), сухая трава (желтый цвет)

Так как поток грунта на изображении отражен коричневым цветом, достаточно эффективным способом выделения изображения потока грунта является выделение красного канала (рисунок 5.3). В целом на изображении хорошо выделяется параболическая форма потока.



Рисунок 5.3 – Изображение потока грунта, полученное выделением красного (R) канала изображения в формате RGB

Однако недостаток метода выделения красного канала связан со сложностями распознавания затемненных участков изображения, из которых состоит большая масса двигающегося потока грунта, но отображающаяся в виде черного цвета не имеющегося красноватого оттенка.

Настройка пороговых значений отделения красного канала от зеленого и синего не позволяет надежно выделить наиболее плотную область потока (рисунок 5.4).

 $a (p = 3/255)$  $b (p = 10/255)$

Рисунок 5.4 – Возможность настройки в методе цветового разделения путем подбора порогового значения p при выделении красного канала изображения

Таким образом, метод цветового разделения не может использоваться сам по себе, так как не позволяет получить изображение всего потока, а преимущественно дает изображение части потока с низкой плотностью.

Частицы потока грунта на видеоряде представляют собой черный сегмент, содержащий минимальную яркость. Поэтому для отделения потока грунта целесообразно использовать дифференциальный яркостной метод. Для этого используется два изображения: исходный кадр (рисунок 5.5), содержащий качественное изображение фона, и текущий кадр (в частности, рисунок 5.1), на котором движется поток грунта.



Рисунок 5.5 – Исходный видеокادر при подготовке к полевому исследованию

При обработке программой, разработанной в рамках научной работы, производится выделение тех пикселей, которые стали более темными на текущем видеокadre по сравнению с исходным видеокadre (рисунок 5.6). Как видно из рисунка 5.6, метод дифференциального яркостного разделения позволяет выделить наиболее плотную область (ядро) потока грунта, отображенную на изображениях практически черным цветом и представляющий наибольшую ценность для создания плотной полосы заданной ширины при проведении противопожарных работ.

Необходимо отметить, что помимо потока грунта определяются

артефакты в большом количестве, вперемешку с перемещающимися ветвями и стволами деревьев под действием ветра. Но фоновые флуктуации могут быть устранены путем усреднения изображений по множеству кадров (порядка $10^2 \dots 10^3$), то есть не представляет неразрешимую проблему.



Рисунок 5.6 – Выделение изображения потока грунта по яркости

Все же яркостная технология не обеспечивает выделение всего потока грунта. Поэтому целесообразно использовать комбинацию приведенных выше методов: определение параметров потока грунта по красному каналу и по низкой яркости. Как видно из рисунка 5.7, выделенный таким методом поток грунта практически полностью соответствует исходному изображению потока грунта на рисунке 5.1. В процессе обозначилось, что изображения фона мешают выполнению оцифровки результатов, но они убираются при помощи усреднения видеок кадров.

Выполнение задачи этим методом позволяет выполнить фильтрацию зон пыли на видеоряде. На рисунке 5.7 это беловатые области над и под потоком грунта. Эти области имеют высокую яркость и малую цветовую насыщенность, поэтому не распознаются как принадлежащие потоку грунта. Данные области нецелесообразно учитывать в структуре потока, как имеющие низкую ценность

при проведении противопожарных работ.



Рисунок 5.7 – Комбинированный метод выделения потока грунта по яркости и цветности

Комбинированного метода определения характеристик потока, движущегося в воздушном пространстве грунта, по яркости и цветности, вполне хватает, чтобы определить заданные характеристики.

Из множества подходов в рамках исследований было рассмотрено оптическое распознавание, наиболее часто применяемое при решении задач с оцифровкой изображений. В рамках работы в усеченном формате описано, как оцифровку фотографий с интересующими объектами возможно отделить от фона, при применении к отдельному кадру или для n -го количества и разделение изображений на несколько частей с выделением объекта. В ходе исследования выполнен перебор различных подходов в данной области и определен наиболее эффективный. Для каждого анализируемого видеокadra производилось предварительное усреднение изображения по 20 видеокдрам (10 до текущего кадра и 10 после). После этого определялась разность интенсивности текущего видеокдра и усредненного (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Выделение потока грунта методом отличия текущего видеокadra от усредненного по 20 ближайшим видеокadрам

Такой подход считается эффективным для большого количества технических систем, но для решения задачи по определению характеристик движущегося потока грунта он оказался слабо эффективен. Следует учитывать, что поток грунта по мере продвижения МГА визуально отображается на одном и том же месте по видеоряду, что негативно сказывается на отделении изображения от видеоряда, не позволяет отследить ядро потока, но дает возможность определить флуктуации потока частиц грунта и его дискретную структуру. Это позволяет применять метод для определения пешеходов, автомобилей от фона и т.д., но эффективность применения для нахождения слабо меняющегося дисперсного материала под большим вопросом.

Если бы фон был неизменным, можно было бы использовать исходный кадр (на котором отсутствует поток грунта). Однако ветер приводит в движение ветви и деревья, которые отображаются как фон на изображениях, и при попытке выделить текущее изображение от исходного остается множество артефактов этого фона, на которых полезное изображение потока грунта теряется в шуме

артефактов.

Подобным образом подход с отделением потока грунта от фона применять слабо эффективно. Определение размытых в воздушной среде участков областей из-за мелкодисперсной структуры, высоких скоростей и практически непрерывной фракции на видеоряде потока грунта отображается «размытым в движении». В этой связи рационально выполнить проверку методом определения локальной размытости видеокadra. С помощью разработанной программы произведено построение картограммы размытости изображения. При этом для оценки локальной размытости производилось сканирование окном 40 x 40 пикселей на изображении 1920 x 1080 пикселей (рисунок 5.9).



Рисунок 5.9 – Картограмма размытости изображения потока грунта

Тем не менее такой подход отображает низкую эффективность на определение потока грунта. При этом метод оказался мало эффективным для реализации поставленной задачи. Основные сложности возникают при фоновом видеоряде с недостаточно высоким уровнем контрастности на расстояниях между элементами деревьев и артефактов JPG-сжатия, из-за технических ограничений видеоаппаратуры отображается как размытое почти схожее с

потоком грунта. Проведение исследования при помощи такого подхода будет не эффективно.

5.2. Определение фрагментов изображения, перемещающихся от кадра к кадру

Более сложные методы распознавания основаны на методах совмещения изображений с использованием методов оптимизации. Для отделения потока грунта от фона использовался следующий метод. На текущем видеокадре выбиралось окно сканирования 40x40 пикселей, и такое же окно искалось на исходном видеокадре без потока грунта. При совмещении окна с исходным изображением использовался оптимизационный алгоритм, в котором подбирались параметры сдвига окна по горизонтали и вертикали. Критерий несовпадения окончательно найденного окна фактически представлял собой «прозрачность». Поэтому полученная в результате сканирования окном 40 x 40 пикселей картограмма представляет собой картограмму прозрачности изображения (рисунок 5.10).

Можно ожидать, что картограмма прозрачности позволит получить искомую картограмму плотности потока грунта. Действительно, поток грунта выделяется на картограмме, особенно его ядро в начальной части траектории. Однако движение ветвей деревьев привело к тому, что на изображении фона присутствуют более мощные области, мешающие определить структуру потока грунта на второй половине траектории его движения.

Поэтому метод совмещения изображений также не является эффективным методом для определения характеристик потока грунта в воздушном пространстве.

Проведенные предварительные аналитические исследования позволяют выявить, что определение потока грунта по видеоряду максимально эффективно провести при помощи комбинированного цвето-яркостного метода, которым и будет реализовано дальнейшее научное исследование.



Рисунок 5.10 – Картограмма прозрачности видеокадра с потоком грунта по сравнению с исходным видеокадром без потока грунта

5.3. Определение дискретности потока: выброса каждой лопастью

Поток грунта, подаваемый от базовой грунтометательной машины, не является сплошным. Одной из причин не сплошности является периодическое действие грунтометательного механизма: лопатки поочередно производят метание порции грунта. Однако по видимому изображению потока грунта сложно распознать дискретность потока. На рисунке 5.11 приведено изображение, где периодичный характер потока грунта наиболее выражен.

На большинстве других кадров дискретность потока явно невыраженная. Кроме того, наблюдается случайная дискретность потока, связанная с флуктуациями структуры захватываемых порций лопастями грунта, особенностями разрушения фрагментов грунта грунтометательной машиной. Поэтому принято решение в полевом экспериментальном исследовании не анализировать дискретность потока грунта.

Позиция съемки занимает фиксируемое положение, и не позволяет находиться на максимальном удалении от места прохода машины и является

величиной фиксированной. На изображениях показано сферическое оптическое искажение видеоряда, что сказывается на усложнении процедуры получения требуемых результатов. Для решения этой проблемы был составлен отдельный математический аппарат.



Рисунок 5.11 – Периодические уплотнения потока грунта, позволяющие определить дискретный характер выброса каждой лопастью

Первоначально необходимо принять схему объектива эквидистантной, представляющую собой радиальную составляющую бочкообразной дисторсии. Тогда возможно применять выражение:

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p f(r_p). \quad (5.1)$$

Это выражение возможно решить выражением f произвести расчет найденных на плоскости пикселей с координатами r_p , используя находящиеся на полусфере пиксели с координатами r_s (r – векторная величина). Выражение f определяется как аналитическая формула:

$$f(r) = \frac{2R_0}{\pi r} \operatorname{arctg} \left(\frac{\pi r}{2R_0} \right), \quad (5.2)$$

где R_0 – это радиус в пикселях, соответствующий углу 90° на исходном изображении относительно оси симметрии объектива.

На основании описанного выше выражения преобразования f выполнена первоначальная коррекция сферического искажения обрабатываемых изображений видеоряда.

В процессе реализации поставленных задач раздела выполнена проверка эффективности выбранных пяти подходов к оптическому распознаванию мелкодисперсной среды потока грунта, движущегося в воздушном пространстве, полученного в ходе полевых экспериментов. Выбран высокоэффективный подход в виде цвето-яркостного определения характеристик потока грунта, при котором лучше всего производить проверку от фона, содержащего на фоновом изображении проекции ветвей деревьев, травы и иных объектов, находящихся в движении.

5.4. Методика определения характеристик потока грунта по видеоряду

Первоначально проведены исследования, которые позволили определить, что цвето-яркостной метод обработки потока грунта по видеоряду считается высокоэффективным для полученных в полевом экспериментальном исследовании видеозаписей. Изложим подробнее математический и алгоритмический аппарат, а также программную реализацию, которые обеспечат высокую точность при отделении изображений потока грунта от фона и определении параметров потока грунта.

5.5. Математический аппарат для выделения потока грунта от фона

В процессе реализации поставленной задачи использованы фотографии расширением BMP с областью 1920 x 1980 пикселей. При реализации этим методом каждый из пикселей обозначен тремя цветами. В качестве основной цветовой гаммы заданы три основных спектра: красный, зеленый и синий. Очень часто наименование такого подхода возможно встретить как RGB (Red, Green, Blue) с показателями эффективности переноса по каждому каналу

1 байт/пиксель.

Если выполнить проверку изображения при помощи составленного математического аппарата, то выходит, что результат предстанет в виде матрицы яркости $I_{ij}^R, I_{ij}^G, I_{ij}^B$,

где R, G, B – индекс цветового канала (красный, зеленый, синий соответственно);

i и j – номера пикселя по горизонтали (слева направо) и вертикали (сверху вниз).

При обработке видеоряда с помощью метода цвето-яркостного установления характеристик потока частиц грунта строится матрица $I_{ij}^{пг}$, части которой позволяют делать выбор из двух вариантов: «1», в том случае, когда в точке видеоряда отображается поток частиц грунта или «0», когда в указанной зоне отображается фон на видеоряде, а не поток частиц грунта.

Цвето-яркостное определение выполнено при помощи условия

$$I_{ij}^{пг} = \begin{cases} \mathbf{1}, & \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} I_{ij}^R > I_{ij}^G + \mathbf{8}; \\ I_{ij}^R > I_{ij}^B + \mathbf{8}; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{ij}^R > I_{ij}^0; \\ I_{ij}^R > I_{ij}^G; \\ I_{ij}^R > I_{ij}^B; \end{array} \right. \end{cases} \\ \mathbf{0}, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (5.3)$$

где «8» – константа запаса надежности отделения красного цвета от зеленого и синего каналов (может использоваться другое число, подбираемое в процессе предварительной настройки; число 8 указано для диапазона яркости 0...255);

I_{ij} и I_{ij}^0 – яркости пикселя ij , переведенные в градации серого для текущего изображения и калибровочного изображения без потока грунта (кадр до начала метания потока грунта).

В процессе нахождения основных характеристик движущегося потока частиц грунта на виде «сзади» требуется принимать во внимание постепенное отдаление МТА с навешенной машиной.

В рамках этого выполнена коррекция видеоряда на известное расстояние

между задними указателями поворота МТА, отображение которых имеет цветовое отличие (желтый цвет) от фона и позволяет отличить на изображениях. В рамках этого выполнено линейное преобразование:

$$I_{ij}^{\text{ПК}} = I_{i \cdot L / L_0, j \cdot L / L_0}^{\text{ПК}}, \quad (5.4)$$

где L и L_0 – расстояние между указателями поворота на текущем видеокадре и исходном видеокадре.

В ходе научных изысканий для решения поставленных задач требовалось найти пиксели, отражающие положение указателей поворота как отправной точки на фотографии видеоряда. Решение задачи реализовано при помощи программного алгоритма на ряд $10^2 \dots 10^3$ видеокадров, для этого понадобился надежный поисковый подход. В основе подхода лежит метод Монте-Карло со снижением количества диапазонов. Основным требованием является нахождение меток x_i, y_i , обозначающих центральное значение для указателя поворота МТА ($i = 1 \dots 2$) в ортогональной системе координат, объединённой с фотографией. В последующих исследованиях применяем обозначение p_{ji} .

где p – искомый параметр;

j – номер параметра (1 – 2 – координата y);

i – номер указателя поворота (рисунок 5.12).



Рисунок 5.12 – Метки задних указателей поворота трактора на желтом канале изображения

Требование к поиску обозначено как к оптимизационной задаче [230, 241], но в данном случае критерием оптимизации K обозначена численность пикселей желтого оттенка в области обработки [10, 68, 100, 124, 145, 159, 163, 167, 188, 217, 229, 239]. Требуется установить окно для обработки изображения областью размером 25×25 пикселей, отыскать данные координат центральной точки x, y , максимальное скопление пикселей желтого цвета в окне обработки.

$$K(x, y) = \sum_{i=0}^{25} \sum_{j=0}^{25} I_{x+i, y+j}^Y, \quad (5.5)$$

где I^Y – интенсивность пикселя желтого канала изображения.

Программа исследования предполагает определение значения максимального критерия K .

По плану исследования требуется отыскать максимум критерия K . Поиск и фиксация x, y точек указателя поворота по видеоряду изображения с областью 1920×1080 лучше всего реализовать при помощи численной оптимизации. Трудности оптимизации возникают из-за дискретности значений x, y и повышенным значением ложных локальных оптимумов (порядка $10^2 \dots 10^5$). На основании этой информации определяется потребность в большом количестве повторений для решения поставленной задачи и целесообразно применять универсальный подход «метод Монте-Карло (МК), но необходимо помнить, что это будет требовать большого количества вычислительных ресурсов.

Вкратце подход МК охватывает большое количество случайных показателей характеристик x, y и в дальнейшем определение комбинации характеристик для того, чтобы критерий K имел высокий показатель. В качестве повышения скорости сходимости метода МК применена его видоизмененная форма с уменьшением количества диапазонов. В качестве основного подхода к решению задачи взят модернизированный метод Монте-Карло с сужением диапазонов (МКСД). Таким образом возможно применять многократный «поиск с начала», который позволяет уменьшить количество вероятностей в процессе поиска максимума.

Диапазон действий в МКСД если обозначить в количественном

исполнении, то будет в диапазоне до 40000. Каждый шаг формирует случайный пакет значений x , y , такое возможно за счет алгоритма рандомизации значений с одинаковым распространением вероятности

$$\begin{aligned}x &= G_{11} + F_{3i-2} \cdot (G_{12} - G_{11}); \\y &= G_{21} + F_{3i-1} \cdot (G_{22} - G_{21});\end{aligned}\quad (5.6)$$

где G_{11} и G_{12} – границы диапазона поиска переменной x (границы изображения 0 и 1920 пикселей соответственно);

G_{21} и G_{22} – границы диапазона поиска переменной y (границы изображения 0 и 1980 пикселей соответственно);

i – номер итерации;

F_k – последовательные реализации случайной величины, распределенной равномерно в диапазоне 0...1 [100, 229];

k – номер реализации случайной величины F .

Рандомизация переменных x , y описывает критерий оптимизации K выражением (5.7). В том случае когда значение критерия K обозначается больше полученного ранее значение K_b (индекс «b» – от английского слова best – лучший), то есть $K > K_b$, выполняется запоминание проходящего набора значений x , y как оптимального: $x_b = x$, $y_b = y$.

Следующий этап исследований связан с поиском точки опоры, в данном случае за якорь выбран указатель поворота МТА, который позволит выполнить задачу оптимизации:

$$K(x_i, y_i) \rightarrow \max \Rightarrow x_i^{\text{опт}}, y_i^{\text{опт}}, \quad (5.7)$$

где $x_i^{\text{опт}}$, $y_i^{\text{опт}}$ – координаты расположения квадратного окна, лучше всего охватывающего указатель поворота.

Алгоритм решения задачи оптимизации. На рисунке 5.13 приведен алгоритм поиска методом Монте-Карло с сужением диапазонов.

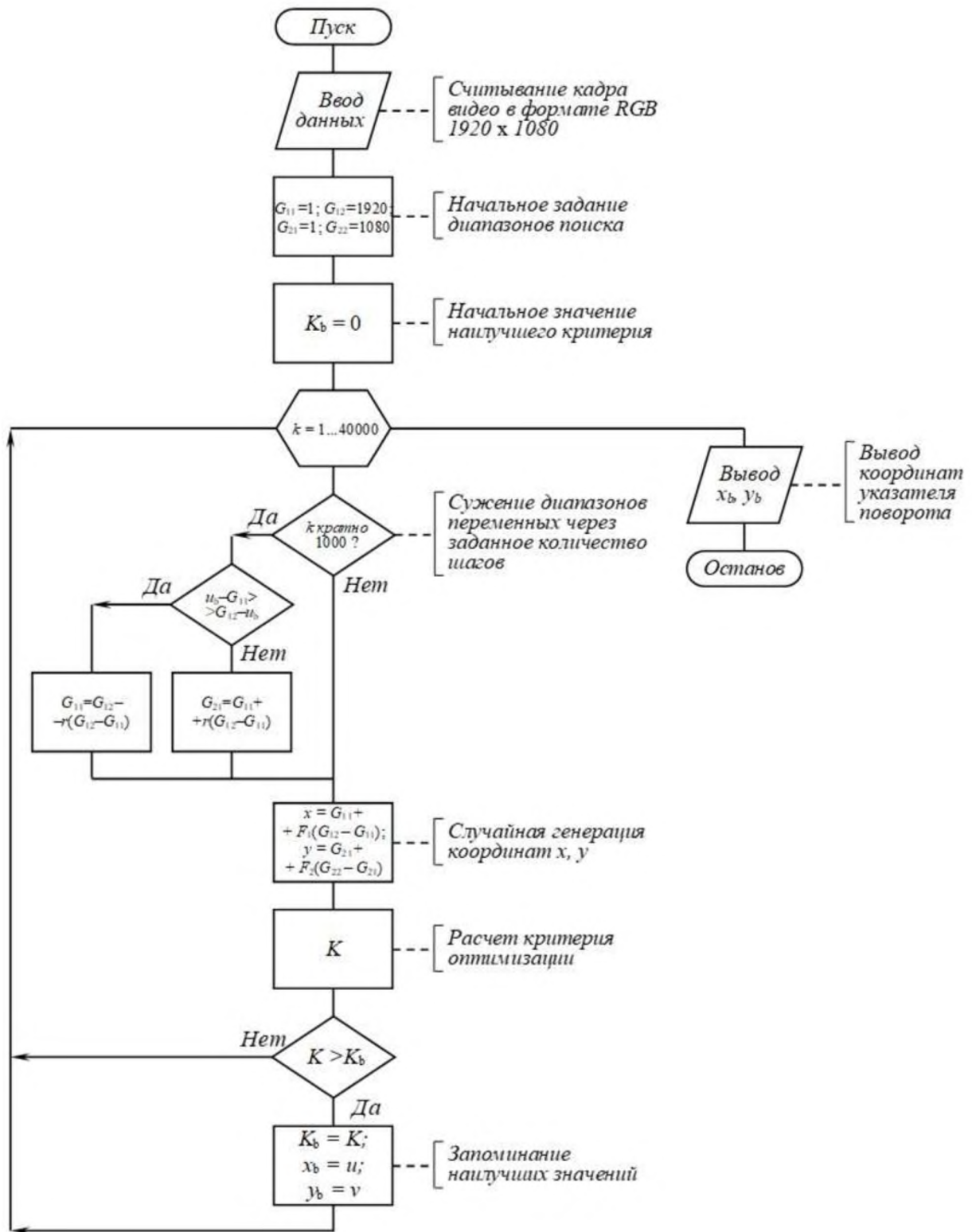


Рисунок 5.13 – Схема алгоритма поиска указателей поворота трактора на изображении

Нахождение значений параметров потока грунта. Для нахождения параметров потока частиц грунта в воздушном пространстве выполнено с

первоначальным усреднением картограмм разлета частиц грунта по большому количеству кадров в районе 600 шт, это около 20 секунд эксперимента при скорости съемки 30 кадров в секунду.

На основании среднего значения картограммы, выполненной в виде матрицы с областью 400x400 элементов, считались описанные ниже показатели потока частиц грунта.

В процессе выполнения научных исследований были разработаны и реализованы две программы с автоматическим алгоритмом для оцифровки видеоряда изображений полевых экспериментальных исследований с базовым вариантом грунтометательной машины.

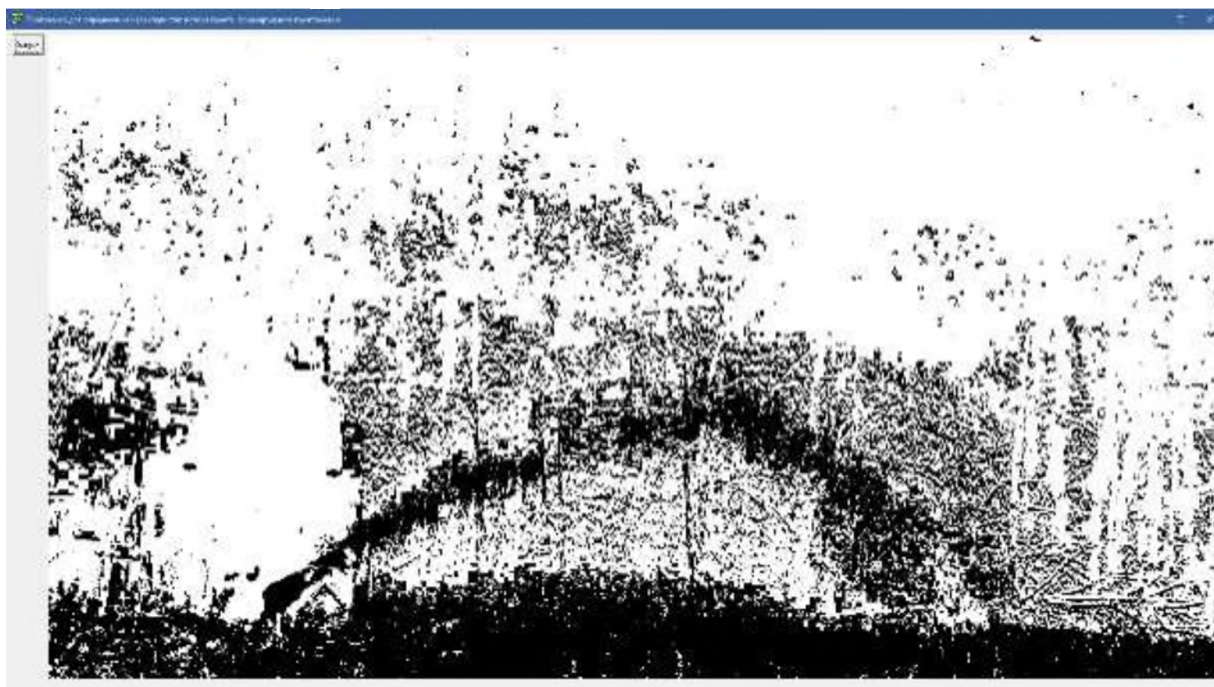


Рисунок 5.14 – Интерфейсная форма программы «Программа для поиска способа отделения потока грунта от фона на изображениях»

Первая программа «Программа для поиска способа отделения потока грунта от фона на изображениях» (рисунок 5.14) позволила проверить пять способов выделения потока грунта от фона и установить, что цвето-яркостный способ является наиболее эффективным.

Вторая программа «Программа для определения характеристик потока грунта, формируемого машиной для тушения и предотвращения лесных пожаров» (рисунок 5.15) предназначена для постройки картограмм распределения плотности потока грунта и нахождения заданных переменных.

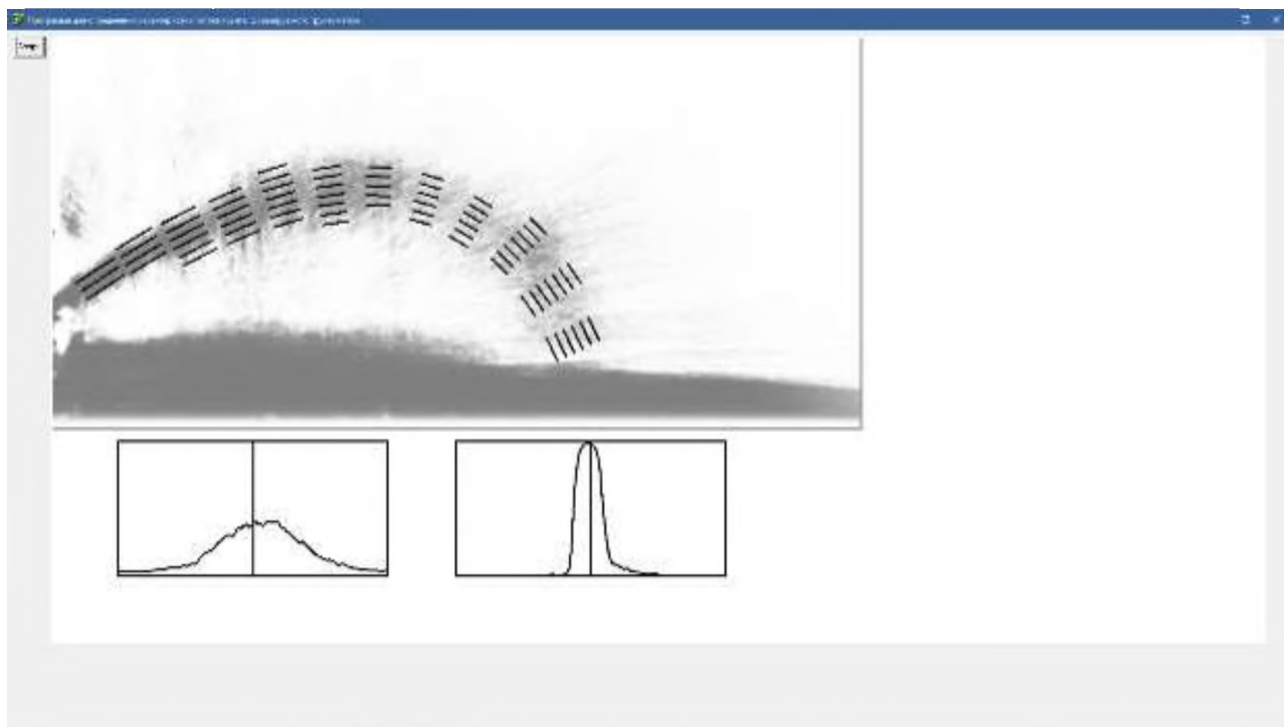


Рисунок 5.15 – Интерфейсная форма программы «Программа для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого машиной для тушения и предотвращения лесных пожаров»

Программа предназначена для оптического распознавания и нахождения показателей потока частиц грунта в воздушном пространстве, направляемого грунтометательной машиной, на фотографиях видеоряда полевого эксперимента. Гибкость программы позволяет делать выбор подхода для оцифровки видеоряда потока частиц грунта в воздушном пространстве от фонового искажения. Эффективность программы раскрывается при оцифровке фотографий верхнего и продольного положения съемки грунтометательной машины в процессе работы.

Таким образом, для решения поставленной задачи описана методика и составлена компьютерная программа, позволяющая оцифровать частицы потока грунта, двигающиеся в воздушном пространстве от фона на видеоряде и найти заранее заданные показатели эффективности потока.

Найденные в процессе экспериментов показатели предоставили возможность отыскать основные показатели потока грунта.

5.6. Исследование распределения плотности потока грунта в вертикальной поперечной плоскости

В качестве примера на рисунке 5.16 показана возможность обработки изображения и выведена картограмма разлета частиц грунта в плоскости YZ .

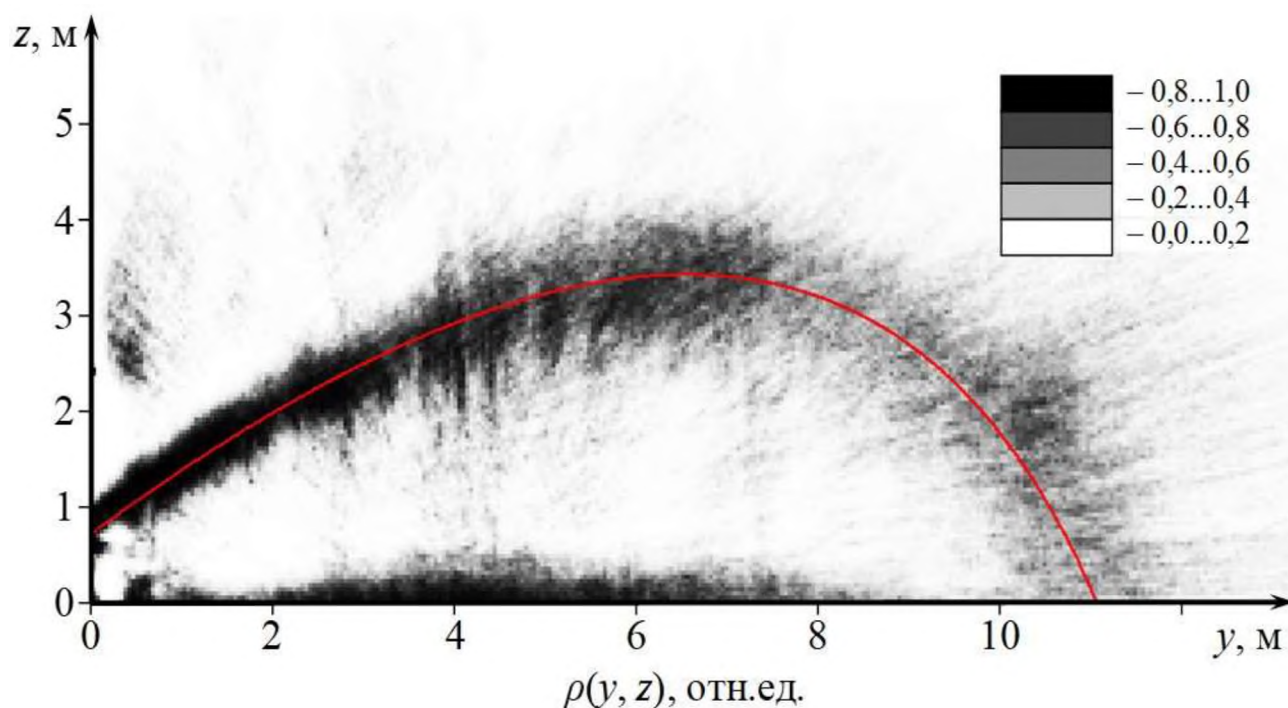


Рисунок 5.16 – Картограмма распределения плотности ρ потока грунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

Изображение с представленной картограммой представлено с усредненным показателем кадров 600 за 20 секунд работы грунтометательной машины с частотой съемки 30 кадров в секунду.

По итогу выполненной оцифровки найдена картограмма с высоким качеством с минимальным значением артефактов от посторонних предметов в виде деревьев, ветвей и т.д.

Следует указать, что отображение показания усредненного потока грунта в воздушном пространстве является направленным в заданный квадрат и отображается как сфокусированный относительно пятна контакта в точке приземления, а графическое отображение в виде картограммы усреднено по продолжительному временному отрезку около 20 секунд.

По оптическому анализу фотографий возможно определить, что поток частиц грунта значительно варьировался: на дистанции от 4 м до 15 м. Ширина показателя усредненного потока частиц грунта свидетельствует о том, что около 80 % времени определяется узкий поток грунта и 20 % времени отклонения не позволяют этого сделать, что приводит к широкому разбросу частиц грунта.

Выполнена аппроксимация линии перемещения потока частиц грунта, процесс показан на рисунке 5.16 и выделен красной линией, обозначающей баллистическую траекторию, найденную в процессе выполнения выражения для перемещения тела, подкинутого под углом к горизонту и на которое оказывают воздействие силы тяжести и сопротивление воздуха. По характеристикам постановления баллистической задачи, грунтометательная машина направляет потоки частиц грунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с. Дальность метания грунта составляет 11 м.

С увеличением дистанции от МТА с машиной уменьшается объем летящего в потоке грунта.

5.7. Исследование распределения в вертикальной поперечной плоскости абсолютного значения скорости частиц грунта

Проанализировав движение в воздухе идентичных фрагментов фотографии потока частиц грунта в воздушном пространстве, в покадровке составлена картограмма, показанная на рисунке 5.17, с отображением абсолютного показателя скорости потока частиц грунта.

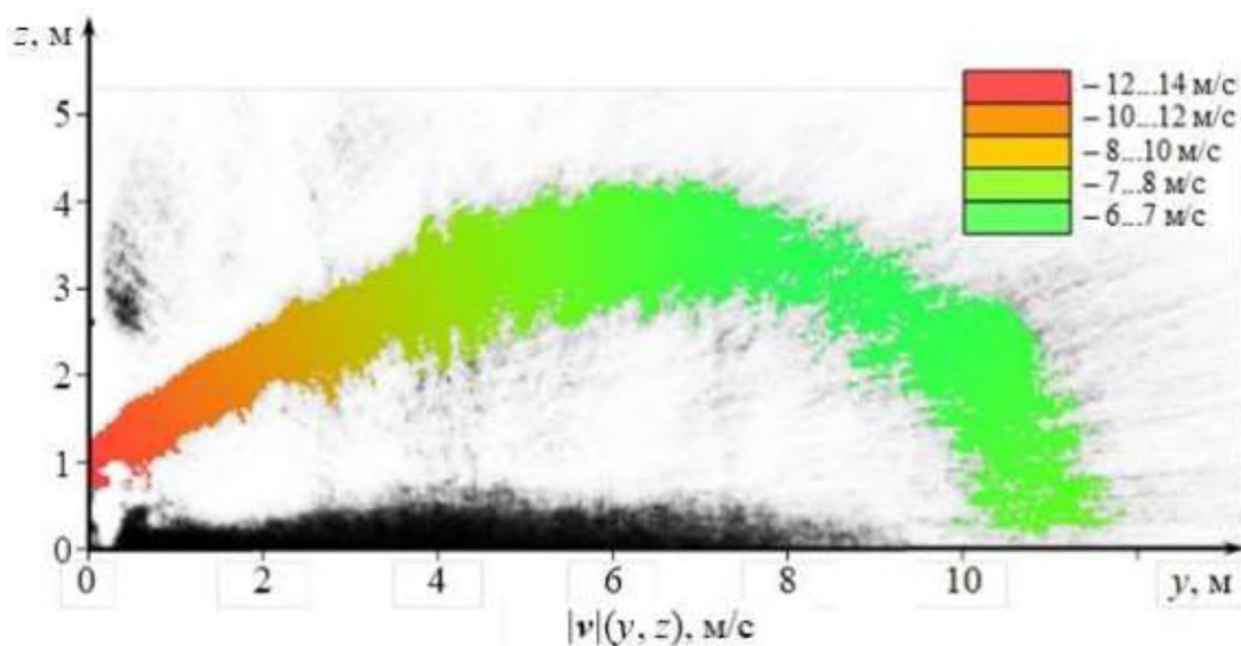


Рисунок 5.17 – Картограмма распределения абсолютного значения скорости $|v|$ потока грунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

В процессе перемещения в воздушном пространстве потока частиц грунта характеристика скорости первоначально уменьшается с 14 до 6 м/с из-за перемещения грунта вверх и изменения кинетической энергии в потенциальную, а далее повышается с 6 до 8 м/с в процессе осаждения потока на плоскость земли за счет перехода потенциальной энергии в кинетическую.

5.8. Исследование распределения в вертикальной поперечной плоскости вектора скорости частиц грунта

Таким же подходом (рисунок 5.18) выполнен анализ, позволивший построить картограмму распределения сторон направления вектора скорости элементов грунта. При помощи представленной картограммы стало возможным найти угол, под которым частицы потока грунта падают на землю, это приблизительно 73° к горизонту. Если разделить процесс полета потока грунта на составные части, то возможно отменить, что на начальном этапе частицы перемещаются в большей степени горизонтально, а вертикально в меньшей. В зоне осаждения наблюдается процесс вертикального опускания потока частиц грунта, но с небольшими изменениями координат в горизонтальном направлении, такой технологический подход положительно сказывается на процессе тушения пожара.

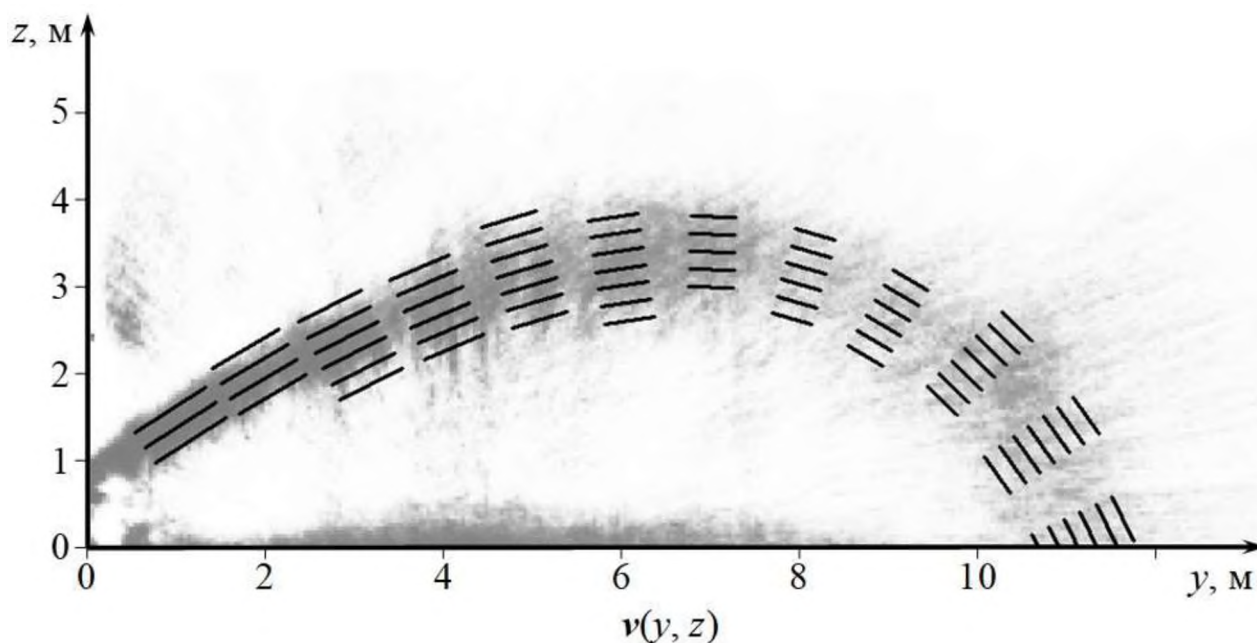


Рисунок 5.18 – Картограмма распределения вектора скорости v частиц грунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

5.9. Исследование углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) плотности метания грунта

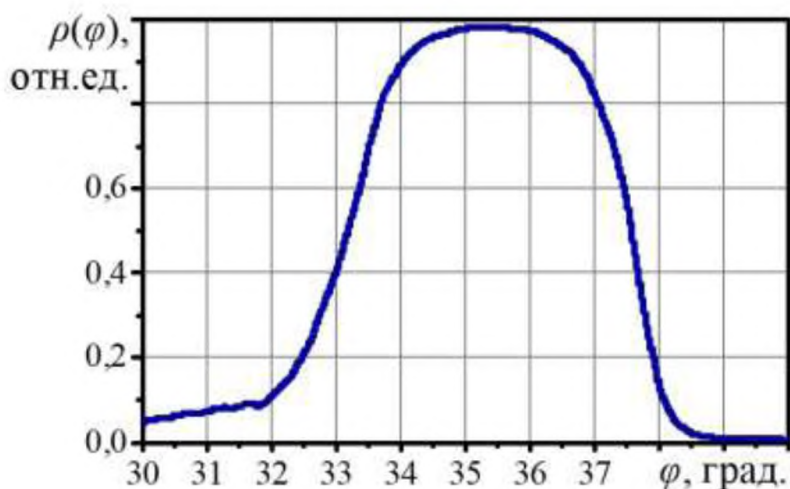


Рисунок 5.19 – Эпюра углового распределения плотности метания грунта

В соответствии с показаниями, полученными по картограмме на рисунке 5.18, допустимо графически изобразить эпюру углового распределения плотности грунта в первоначальном отрезке траектории, показанную на рисунке 5.19. Эпюра представляет собой не гауссову форму, а форму прямоугольную, что говорит о качественной фокусирующей способности грунтометательной машины. Это отражается на эффективности создания потока с максимальной концентрацией и минимальным углом разлета частиц 5° (от 33° до 38°).

5.10. Исследование углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) скорости метания грунта

На базе данных, полученных по картограмме распределения скорости потока, графически изображена эпюра распределения скорости потока в первоначальной зоне кривой, рисунок 5.20.

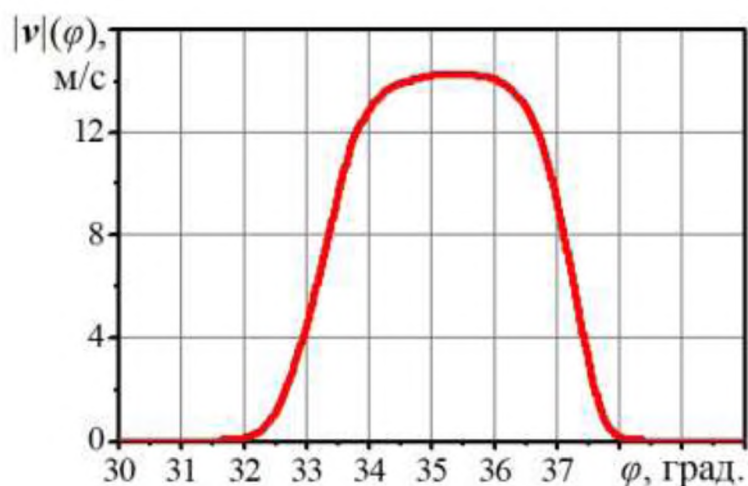


Рисунок 5.20 – Эпюра углового распределения скорости частиц грунта

Эпюра представлена в виде прямоугольной фигуры, при детальном анализе которой возможно определить, что в диапазоне $34,3...36,5^\circ$ характеристика скорости частиц представляет показатель 14. Возможно отметить, что полученная эпюра асимметрична: наблюдается больший разлет по скоростям в нижней части эпюры, из этого следует, что происходит опад пыли под траекторией основного потока частиц грунта.

5.11. Исследование распределения плотности оседания грунта на поверхности

Дальнейшее исследование направлено на определение показателя эффективности, выраженного в кучности попадания грунта на кромку продвижения лесного пожара, графическое отображение представлено на эпюре, рисунок 5.19. Графическое отображение эпюры на рисунке 5.21 показывает, что объем грунта усреднен по высоте 1 м над поверхностью.

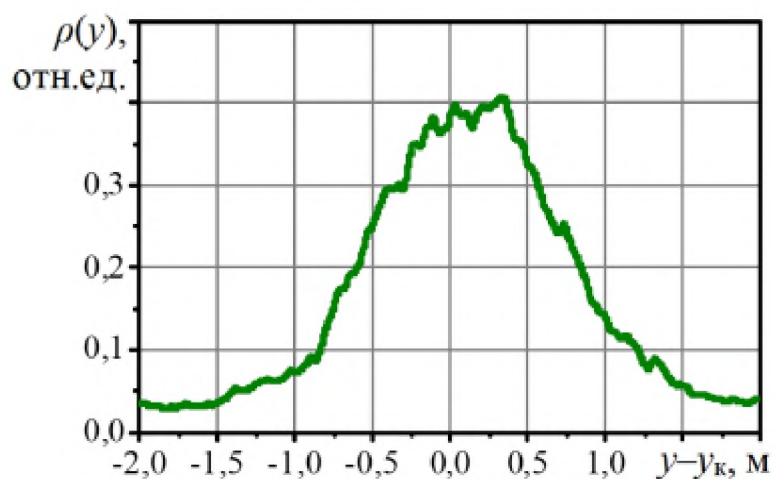


Рисунок 5.21 – Эюра распределения плотности потока грунта перед осадением на поверхность

Как показано на эюре, большая часть объема грунта (около 60 %) попадает в полосу шириной 1,0 м (от $-0,4$ до $0,6$ м), а другая часть грунта (около 30 %) попадает в значения 2,0 м (от $-0,8$ до $1,2$ м). Из этого следует, что грунтометательная машина на выходе показывает достаточно высокие показатели эффективности за счет сужения потока и формирования более прицельной полосы из минерального слоя грунта, который положительно сказывается на процессе тушения лесного пожара.

5.12. Исследование характеристик движения потока грунта в горизонтальной плоскости

Похожим методом найдены данные по потоку грунта в горизонтальной плоскости. На фотографиях на рисунке 5.22 цвето-яркостным методом отделена траектория потока грунта.



Рисунок 5.22 – Исходное изображение потока грунта вид сверху, полученное с видеокамеры беспилотного воздушного судна

На рисунке 5.24 графически изображена картограмма распределения потока грунта, по которой возможно отследить, что поток грунта сдвигается в поперечном направлении и значит $-15,4^\circ$.

Разлет частиц по углам метания в горизонтальной плоскости выше на 20 % и более, в отличие от вертикальной плоскости, и составляет около $6...7^\circ$, что в пределах нормы. Это является показателем того, что грунтометательная машина эффективна за счет создания узкого потока в вертикальном и горизонтальном направлении.

Выполненный блок исследования позволил определить наиболее эффективный метод для оцифровки потока грунта от фона по видеоряду, составить математический аппарат и программу для нахождения показателей потока частиц грунта, подаваемого грунтометательной машиной, графически изобразить картограммы и эпюры основных показателей эффективности в вертикальной и горизонтальной плоскостях.



Рисунок 5.23 – При увеличении цветовой насыщенности видеокadra поток грунта может быть отделен от фона по цветояркостному принципу

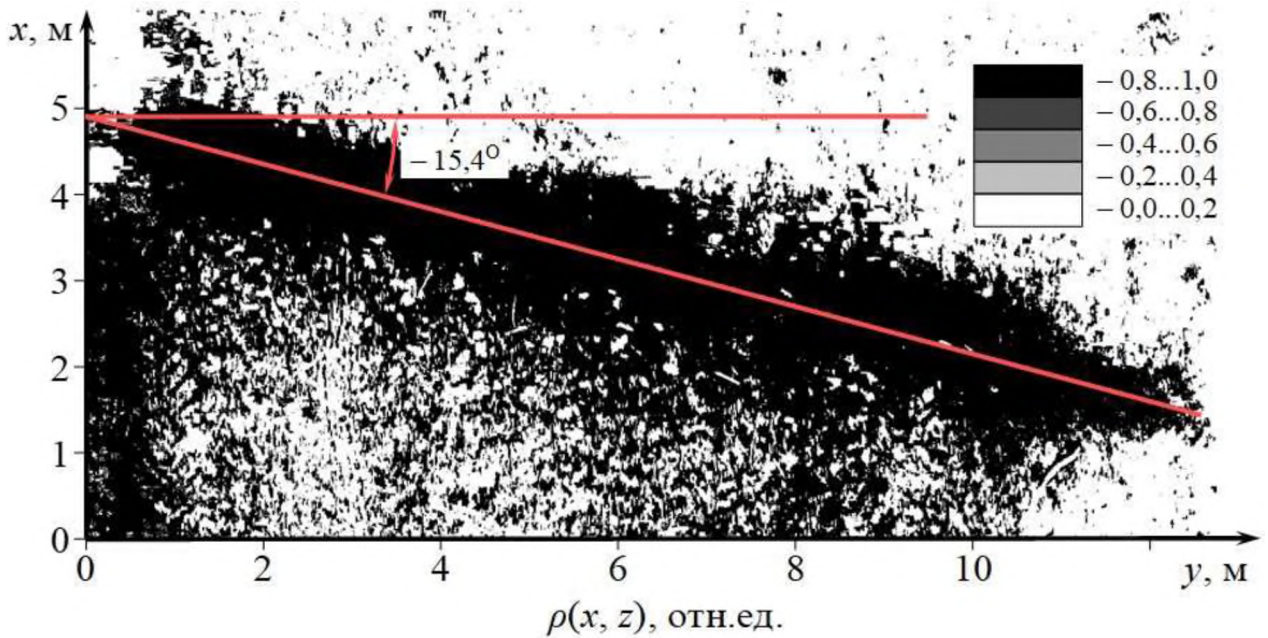


Рисунок 5.24 – Картограмма распределения плотности ρ потока грунта в горизонтальной плоскости XU (вид сверху)

5.13. Сравнение результатов полевого эксперимента и моделирования грунтометательной техники

К настоящему времени накоплен большой объем данных по работе грунтометательной машины и процессам движения потока грунта в воздушном пространстве, взаимодействия грунта с проявлениями лесного пожара: результаты моделирования, результаты лабораторных и полевых экспериментов. В этой связи необходимо установить, как согласуются результаты, полученные на различных этапах исследования.

5.14. Сравнение траекторий движения грунта

Траектории движения грунта визуально совпадают (рисунок 5.25) для нескольких рассматриваемых этапов научных исследований (моделирование, и полевой эксперимент). Во всех случаях форма траектории близка к параболической, незначительно искаженной из-за потери частицами грунта энергии в связи с преодолением сил сопротивления воздушной среды.

Совпадение угла выброса потока грунта (он составляет от 35 до 38 градусов, табл. 5.1) свидетельствует об адекватном воспроизведении в модели и в эксперименте реального процесса взаимодействия рабочих плоскостей грунтометательной машины с грунтом.

Таблица 5.1 - Параметры траектории движения грунта в модели и полевом экспериментах

Этап исследований	Параметры			
	Начальная скорость частиц v_0 , м/с	Угол выброса частиц φ , градусы	Дальность выброса U_{\max} , М	Угол приземления частиц $\varphi_{\text{п}}$, градусы
Модель	11,5	37	11,4	42
Полевой эксперимент	14,0	35	11,0	73

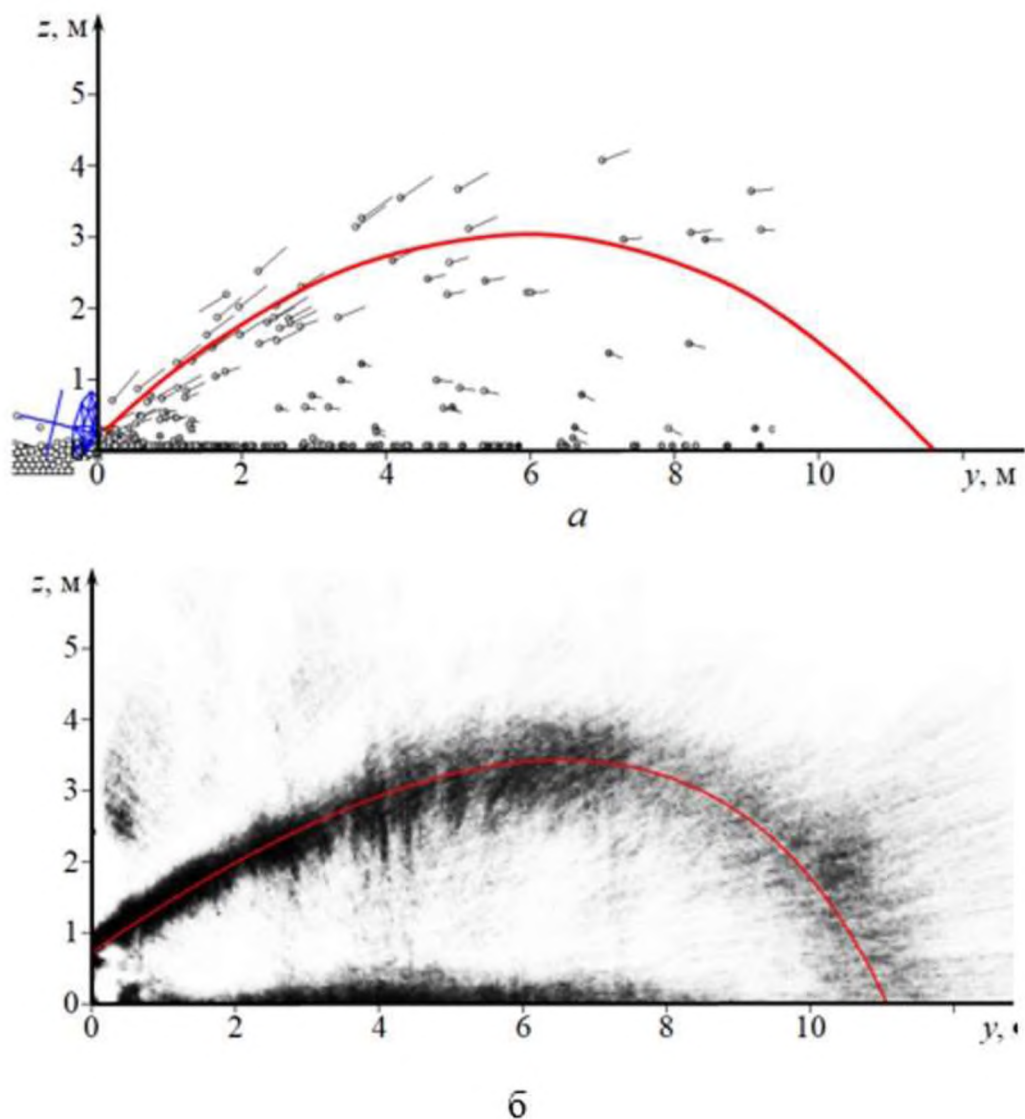


Рисунок 5.25 – Сравнение траекторий полета частиц грунта в модели (а) и полевом (б) экспериментах

Скорость выброса грунта грунтометательным механизмом в модели оказалась несколько ниже (11,5 м/с) таковой в полевом эксперименте (14,0 м/с). Вероятная причина этого – выбрасывание довольно крупных фрагментов грунта в полевом эксперименте.

Дальность выброса грунта приблизительно одинакова на всех этапах исследований и составляет 11,0 ... 12,1 м.

Угол осаждения потока приблизительно равен для модели эксперимента 42° , однако сильно отличается для полевого эксперимента 73° . Это может быть объяснено наличием бокового ветра (около 5 м/с) при проведении полевого

эксперимента, мешающего выбросу грунта, снижающего дальность выброса и делающего более вертикальным осаждение частиц грунта на поверхность.

В целом, сравнительный анализ параметров траекторий позволяет заключить, что результаты всесторонне проведенного исследования (моделирование и полевого эксперимента) хорошо согласуются между собой и свидетельствуют о достаточно эффективной работе базовой грунтометательной машины.

5.15. Сравнение эпюр покрытия поверхности

Эпюры распределения толщины слоя покрытия поверхности получены для всех этапов исследования: модели и полевого экспериментов (рисунок 5.26).

Результаты проведенных этапов хорошо согласуются между собой: на эпюре формируется пик гауссовой формы на расстоянии 10 ... 14 м от грунтометательной машины. Большая часть грунта – около 80 % – оседает в узкой полосе, шириной около 2 м. В интервале расстояний от 2 до 10 м наблюдается незначительное оседание грунта с формированием слоя, толщиной 0,5...2,0 см.

Таким образом, профили толщины осажденного слоя грунта хорошо согласуются и свидетельствуют об адекватности модели и полевого эксперимента.

Результаты сравнительного анализа результатов моделирования и полевого экспериментального исследования, показывают, что:

- модель адекватна по отношению к полемому эксперименту;
- результаты этапного исследования хорошо согласуются между собой, не противоречат друг другу;
- различие результатов модели и полевого экспериментов обусловлено различными механическими параметрами грунта.

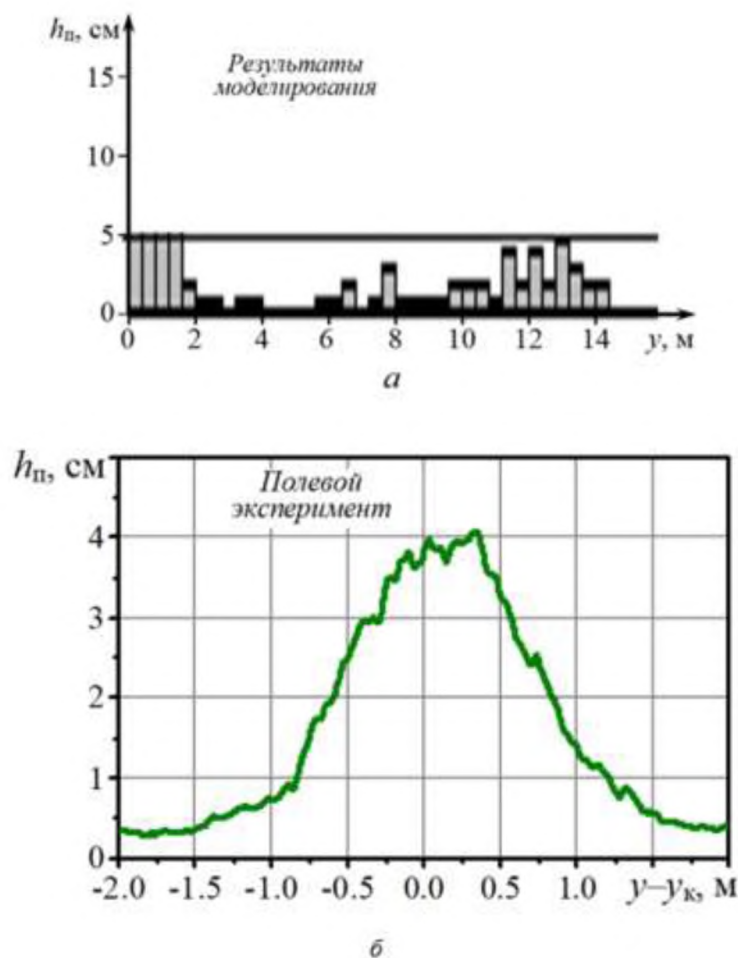


Рисунок 5.26 – Эпюры распределения $h_{п}(y)$ толщины покрытия поверхности грунтом в модели (а) и полевом (б) экспериментах

5.16. Выводы

1. Проанализированы пять методов обработки цифровых изображений полевых экспериментов. Определен наиболее подходящий метод для оцифровки характеристик мелкодисперсного потока грунта, цветно-яркостной метод позволил отделить характеристики потока от сторонних предметов.

2. Разработана методика и составлена программа, позволяющая методами математического вычисления по видеокдрам вести оцифровку данных потока грунта, движущегося в воздушной среде, и выводить результаты в виде информационного файла.

3. С использованием возможностей составленного математического аппарата и программной обработки видеоряда собрана информация по показателям эффективности потока частиц грунта, создаваемого базовой грунтометательной машиной. Графическое отображение параметров плотности и скорости потока грунта в вертикальной и горизонтальной областях.

4. Найденные показатели на видеоряде полевых экспериментов отображают эффективность работы базовой грунтометательной машины в количественных характеристиках, выраженных в дальности метания потока на расстояние от 10 до 20 м и сосредоточенность в зоне падения от 2 до 4 м.

5. Опираясь на графическое изображение пути полета потока грунта, определено, что базовая грунтометательная машина направляет потоки частиц грунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с, дальность метания грунта составляет 11 м.

6. В процессе перемещения в воздушном пространстве потока частиц грунта характеристика скорости первоначально уменьшается с 14 до 6 м/с из-за перемещения грунта вверх и изменения кинетической энергии в потенциальную, а потом повышается с 6 до 8 м/с в процессе осаждения потока на плоскость земли за счет перехода потенциальной энергии в кинетическую.

7. По информации на видеоряде определили значение угла падения потока частиц на землю, который составляет около 73° . Вопреки тому, что первоначально траектория потока направлена горизонтально, чем вертикально, в момент падения потока на землю по картограмме возможно отселить обратный процесс вертикального опускания, чем горизонтального, что повышает эффективность работы грунтометательной техники.

8. Графическое отображение угловых характеристик потока грунта показывает, что форма потока сохраняет прямоугольную форму, что показывает высокие параметры фокусировки грунта. Грунтометательная техника направляет поток грунта с высоким уплотнением, что благоприятно влияет на процесс тушения лесного пожара, угол разлета частиц от общей траектории составляет менее 5° .

9. В стартовой зоне графического отображения траектории параметры углового разлета составляют $34,3...36,5^\circ$, а параметр скорости около 14 м/с, такие параметры показывают эффективность фокуса потока частиц грунта в воздушном пространстве. Повышается разлет частиц в нижней зоне, в области осаждения частиц на поверхность земли, тем самым повышая пятно контакта и зоны накрытия кромки.

10. Наибольший объем грунта около 60 % попадает в зону около 1,0 м (от $-0,4$ до $0,6$ м), другая часть грунта около 30 % падает в зону 2,0 м (от $-0,8$ до $1,2$ м). Полученное количественное подтверждение показывает параметры потока по разлету частиц от основной траектории, что положительно влияет на процесс проведения противопожарных работ.

11. Траектория потока грунта имеет смещение, в перпендикулярном направлении от машины на $15,4^\circ$. Грунтометательная техника создает сфокусированный поток грунта в вертикальной и горизонтальной плоскостях, при этом показатель углового разлета составляет не более 7° .

12. Сравнительный анализ параметров траекторий движения потока грунта, полученных при поэтапном исследовании (моделирование и полевые эксперименты), позволяет заключить, что результаты всесторонне проведенного исследования хорошо согласуются между собой и свидетельствуют о достаточно эффективной работе грунтометательной техники. Начальная скорость частиц составляет $11,5 ... 14,0$ м/с, угол выброса частиц $35 ... 38^\circ$, дальность выброса $11,0 ... 12,1$ м, угол оседания частиц на поверхность $42 ... 73^\circ$.

13. Профили толщины осажденного слоя грунта хорошо согласуются и свидетельствуют об адекватности модели и полевого эксперимента. Большая часть грунта – около 80 % – оседает в узкой полосе шириной около 2 м на расстоянии $11 ... 13$ м от точки выброса. В интервале расстояний от 2 до 10 м наблюдается незначительное оседание грунта с формированием слоя толщиной $0,5...2,0$ см.

6. Теоретическое исследование грунтометательной машины

В работах [78, 85, 92, 96, 97, 98, 110, 111, 116, 117, 118] представлена имитационная модель с цельнокрайними дисковыми рабочими органами, фрезерным рабочим органом, имеющим сложную структуру в виде нескольких рабочих поверхностей, режущей и метаяющей частью, произведено теоретическое исследование направляющего кожуха, состоящего из двух основных частей для фокусировки и направления потока грунта в заданном направлении.

В процессе выполнения научных исследований были разработаны имитационные модели грунтометательной машины, содержащей исследуемые рабочие органы.

Разработанная модель полностью отображает процессы выполнения операций, связанных со взаимодействием рабочих плоскостей базовой грунтометательной машины с грунтом и перемещение грунта в модельном пространстве. В имитации процесса необходимо учитывать повышенное пространственное разрешение и временное для верного отображения передвижения грунта и взаимодействия рабочих плоскостей машины с грунтом в процессе рабочего цикла.

Разработанная имитационная модель предназначена для работы на современных компьютерах. Грунт в имитационной модели задан множеством шарообразных частиц (порядка 10^3 – 10^5). Геометрические параметры частиц в модели возможно задавать как одинакового диаметра, так и различного, что позволяет исключить отрицательные эффекты регулярности плотной пачки частиц. Частицы грунта в процессе имитации контактируют друг с другом и с поверхностями машины (рисунок 6.1).

В исследовании симуляция процесса выполнена методом динамики частиц [18, 40, 88, 104, 134, 233]. Метод является наиболее выгодным для решения ряда задач, включающих работу с почвенными частицами [39, 88].

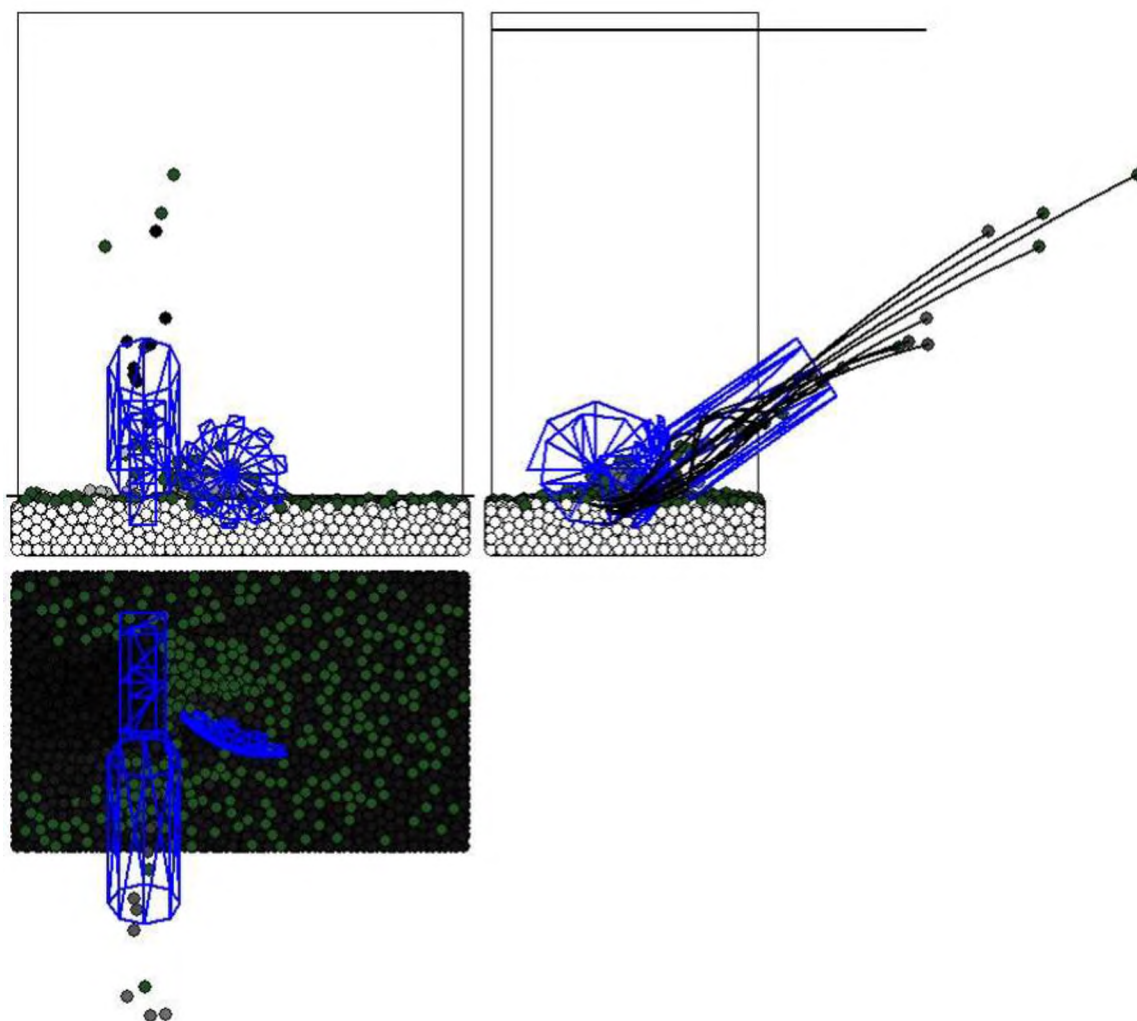


Рисунок 6.1 – Представление модели базовой грунтометательной машины как совокупности элементарных треугольных поверхностей и грунта как совокупности шарообразных элементов (три проекции)

6.1. Описание грунта в модели

Решение поставленной задачи методом динамики частиц становится возможным, если частицы грунта в имитационной модели представлять сферической формы с радиусом 0,02-0,07 мм, а контактное взаимодействие частиц грунта при контакте с плоскостями машины при помощи введения в модель силы упругости и сухого вязкого трения (рисунок 6.2). В основе задания движения частиц в имитационной модели лежат законы классической динамики. В процессе научного исследования требуется воссоздать

структурное изменение частиц (процесс выгрузки или транспортировки), а также обозначить характеристики потока грунта, например, дальность полета частиц (порций), разброс (кучность), ширину зоны покрытия лесного пожара грунтом.

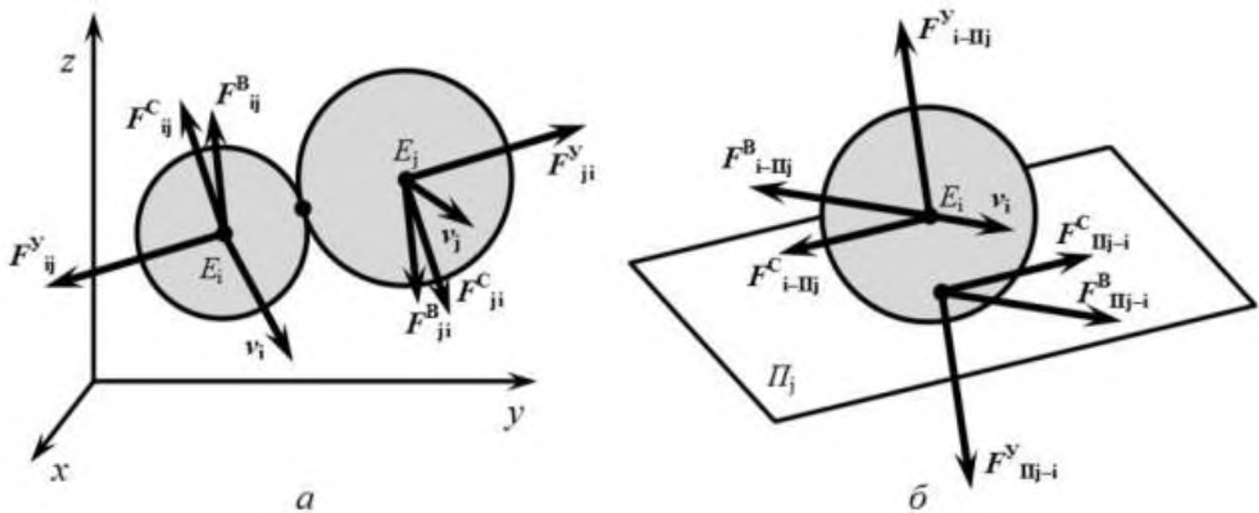


Рисунок 6.2 – Силы, возникающие при контакте двух элементов грунта между собой (а), а также между элементом грунта и поверхностью машины (б):

где F^y – упругие силы, Н;

F^C и F^B – силы сухого и вязкого трения (векторные величины обозначены жирным шрифтом), Н.

Имитационные исследования выполнены в трехкоординатной сетке (x, y, z) . Позиция элемента E_i указана шестью переменными координатами центров (x_i, y_i, z_i) и показателями скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) . Расчет перемещения частиц в рамках модельного пространства выполнен по второму закону Ньютона

$$\begin{aligned}
m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_\Omega} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{xj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{xj}) \right) \left(r_{ij} - \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right), \quad r_{ij} < \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}; \end{aligned} \right\} + \\
& + \sum_{j=1}^{N_\Pi} \left\{ \begin{aligned} & c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{x\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{x\Pi j}) \right) \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_n \frac{d_i}{2} \right), \quad r_{i-\Pi j} < \alpha_n \frac{d_i}{2}; \\ & 0, \quad r_{i-\Pi j} \geq \alpha_n \frac{d_i}{2}; \end{aligned} \right\} + \\
m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = & \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_\Omega} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{yj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{yj}) \right) \left(r_{ij} - \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right), \quad r_{ij} < \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}; \end{aligned} \right\} + \\
& + \sum_{j=1}^{N_\Pi} \left\{ \begin{aligned} & c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{y\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{y\Pi j}) \right) \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_n \frac{d_i}{2} \right), \quad r_{i-\Pi j} < \alpha_n \frac{d_i}{2}; \\ & 0, \quad r_{i-\Pi j} \geq \alpha_n \frac{d_i}{2}; \end{aligned} \right\} + \\
& \left. \begin{aligned} & m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_\Omega} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{zj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{zj}) \right) \left(r_{ij} - \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2} \right), \quad r_{ij} < \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq \alpha_n \frac{d_i + d_j}{2}; \end{aligned} \right\} + \\ & + \sum_{j=1}^{N_\Pi} \left\{ \begin{aligned} & c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{z\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{z\Pi j}) \right) \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_n \frac{d_i}{2} \right), \quad r_{i-\Pi j} < \alpha_n \frac{d_i}{2}; \\ & 0, \quad r_{i-\Pi j} \geq \alpha_n \frac{d_i}{2}; \end{aligned} \right\} - m_i g, \end{aligned} \right. \quad (6.1)
\end{aligned}$$

где i – номер элемента;

N_Ω – количество элементов, шт;

m_i – масса элемента, кг;

t – время, с;

j – номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом;

c_{ij} – коэффициент жесткости взаимодействия элементов i и j (рассчитывается через модули упругости), Н/м;

k_{ij}^C и k_{ij}^B – коэффициенты сухого трения элементов i и j друг о друга;

d_i – диаметр i -го элемента, м;

r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j , м;

α_Ω – коэффициент ограничения взаимодействия между элементами (выбирается из диапазона 1,0...1,1 и позволяет задавать связность или «липкость» почвы);

N_{Π} – количество элементарных поверхностей базовой грунтометательной машины;

$c_{i-\Pi j}$, – коэффициент жесткости, Н/м,

$k_{i-\Pi j}^C$ – сухого трения при взаимодействии элемента i с поверхностью j ;

$k_{i-\Pi j}^B$ – коэффициент вязкого трения при взаимодействии элемента i с поверхностью j , Н·с/м;

$r_{i-\Pi j}$ – расстояние от центра i -го элемента до j -й поверхности, м;

$x_{i-\Pi j}$, $y_{i-\Pi j}$, $z_{i-\Pi j}$ – декартовы координаты точки-проекции центра элемента i на поверхность j , м;

$v_{x\Pi j}$, $v_{y\Pi j}$, $v_{z\Pi j}$ – компоненты скорости центра j -й элементарной поверхности, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Найдена величина силы нормальной реакции заданных частиц грунта, но контактное взаимодействие обозначено как величина от центральной точки частицы r_{ij} и значится меньше, чем $(d_i + d_j)/2$. Величина r_{ij} находится как:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

Следствием составленной системы обозначены выражения $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$, раскрывающие пути перемещения частиц грунта в модельной области и способствующие получению результатов по эффективности.

В процессе моделирования составленная программа не принимает во внимание вращение имитационных частиц относительно своей оси, на конечный результат такой феномен слабо влияет, это возможно за счет того, что частицы комкуются друг с другом. Перемещение комков в процессе имитации происходит автоматически – движением частиц между собой.

Перемещение частиц в процессе имитационного исследования по периметру заданного пространства $L_X \times L_Y \times L_Z$ (рисунок 6.3). Первым этапом является создание уплотнения из модельных элементов в нижней части пространства при помощи заданного в программе алгоритма «встряски» элементов.

Двигающаяся по заданной траектории OY машина контактирует с

дисковыми рабочими органами и фрезеро-метательным рабочим органом с имитационными частицами грунта, собирает порцию частиц из созданной насыпи и придает импульс для полета по баллистической траектории. По траектории прохода машины остается полоса, по своей форме совпадающая с реальными минерализованными полосами. Определение траектории полета возможно за счет того, что имитационное пространство имеет одну из открытых стенок (рисунок 6.3). В модели учтены основные характеристики грунта и это позволяет частицам к концу полета осаждаться в слое почвы.

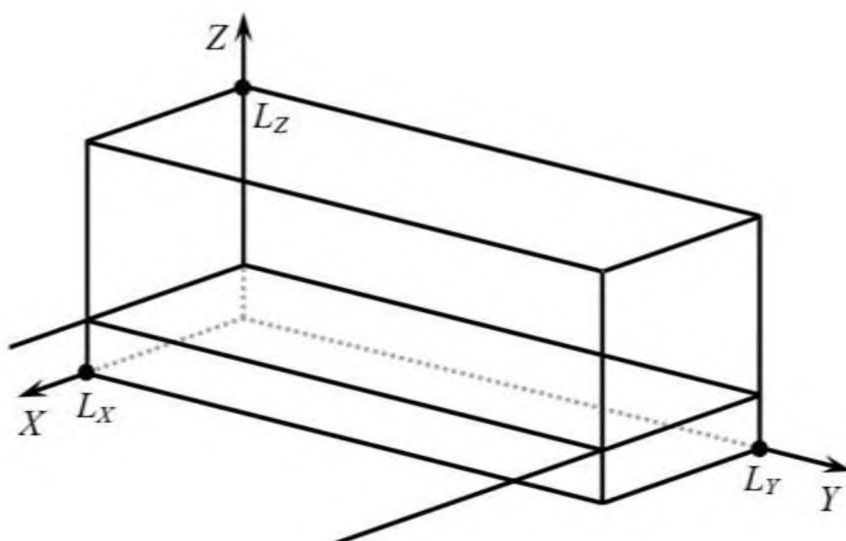


Рисунок 6.3 – Базовый параллелепипед $L_x \times L_y \times L_z$, в котором выполняется имитация, и плоскость осаждения грунта

Активация заранее созданного алгоритма $x_i < 0, y_i < 0, y_i > L_y, z_i < 0, z_i > L_z$, при котором элементы грунта отскакивают от стенок замкнутого контура, выполняется при попадании на них частицы.

В частности, при соблюдении условия $y_i > L_y$, координата y_i , обозначенная для имитируемой частицы, определена функцией вида $y_i = L_y - (y_i - L_y)$, при этом значение скорости частицы по ОУ изменяет знак: $v_{yi} = -v_{yi}$. Когда имитационная частица отлетает от плоскости пространства, происходит снижение энергии по формулам (6.1).

Характеристика заданных в имитационную программу элементов $d_{\text{Э}}$ отражается на корректности имитационной модели грунта. Достоверность отображения имитируемых частиц грунта напрямую зависит от характеристики $d_{\text{Э}}$: чем он меньше, тем выше точность всей системы. При этом численность имитационных частиц $N_{\text{Э}}$, требуемая в качестве соответствия заданному значению уровню частиц грунта $V_{\text{Г}}$, стремительно повышается с уменьшением значения $d_{\text{Э}}$. С повышением объема частиц возрастает число уравнений, которыми задан грунт и, следовательно, возрастает время выполнения имитационного эксперимента. Снижение $d_{\text{Э}}$ всего в два раза ведет к повышению времени исследования в восемь раз. Оптимальные характеристики диаметров грунта для выполнения вычислительного эксперимента должны составлять около 7 см, а объем заданных модельных частиц 10000 шт, такие параметры не будут приводить к долгим расчетам.

После выполнения подготовительного цикла происходит установка взаимодействия частиц друг с другом, в процессе которой массив $K(i, j)$, заполняется имитационными частицами. В начальном условии все внесенные в модель ячейки заполняются как «истинно» или при соблюдении обстановки, когда i и j находятся на расстоянии $r_{ij} < d_{\text{Э}} + d_{\text{М}}$, то обозначаются как «ложно».

В ходе опытов выполняется проверка пар элементов $i-j$ на предмет разделения, если заданные условия $K(i, j)$ не выполнены, то устанавливается значение «ложно». Когда выбран для симуляции рассыпчатый грунт, его частицы изначально по условию считаются несвязанными. Корректное задание частиц является важным условием для создания элементов сложной конструктивно-геометрической формы базовой грунтометательной машины и вязкоупругого взаимодействия с модельным грунтом.

В имитационной модели для упрощения сложных расчетов отображение поверхностей заменены на более простые «плоские фигуры» [207]. Одним из вариантов для упрощения контакта между фигурами принято использовать треугольники. Представление базовой грунтометательной машины в виде элементарных треугольников позволяет провести оптимизацию формы и

геометрические характеристики рабочих органов. Такой подход упрощает процесс изменения характеристик через замену точек координат.

Элементарные фигуры, которыми построены элементы базовой грунтометательной машины, записаны координатами трех вершин $T_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$, $T_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$, $T_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$:

где T – обозначение точки-вершины треугольника;

i – номер треугольника;

индексы 1, 2 или 3 – означают номер вершины для i -го треугольника.

Для описания сложных плоскостей элементарные фигуры соединены друг с другом ребрами. Например, состыкованные треугольники имеют одинаковые координаты двух вершин. Рабочие режущие кромки рабочих органов имеют открытые ребра треугольников.

Процесс работы грунтометательной техники предполагает разные элементарные движения основных рабочих органов, к примеру, часть рабочих элементов фрезы-метателя, дисковых рабочих органов работает по вращательно-поступательному движению, а защитный кожух и почвопровод выполняют только поступательное движение.

6.2. Представление грунтометательной машины в целом

В модели в качестве базового варианта грунтометательной машины взята однорядная по своей конструкции машина. Представленная в виде имитационной модели грунтометательная машина состоит из четырёх основных частей: грунтометательного механизма, защитного кожуха, переходящего в почвопровод, сферического диска. На рисунке 6.4 показаны основные геометрические параметры взаимной компоновки основных частей грунтометательной машины. Компоновочный центр грунтометательной машины в модели C_T совпадал с предполагаемым расположением центра базовой грунтометательной машины. На рисунке 6.4 указано расположение ключевых точек составных частей базовой грунтометательной машины:

C_P – ротора;

C_{II} – почвопровода;

C_D – сферического диска с вырезами.

Расположение ключевых точек выбрано таким образом, чтобы математические выражения, описывающие части грунтометательной машины, можно было составить наиболее простым образом.

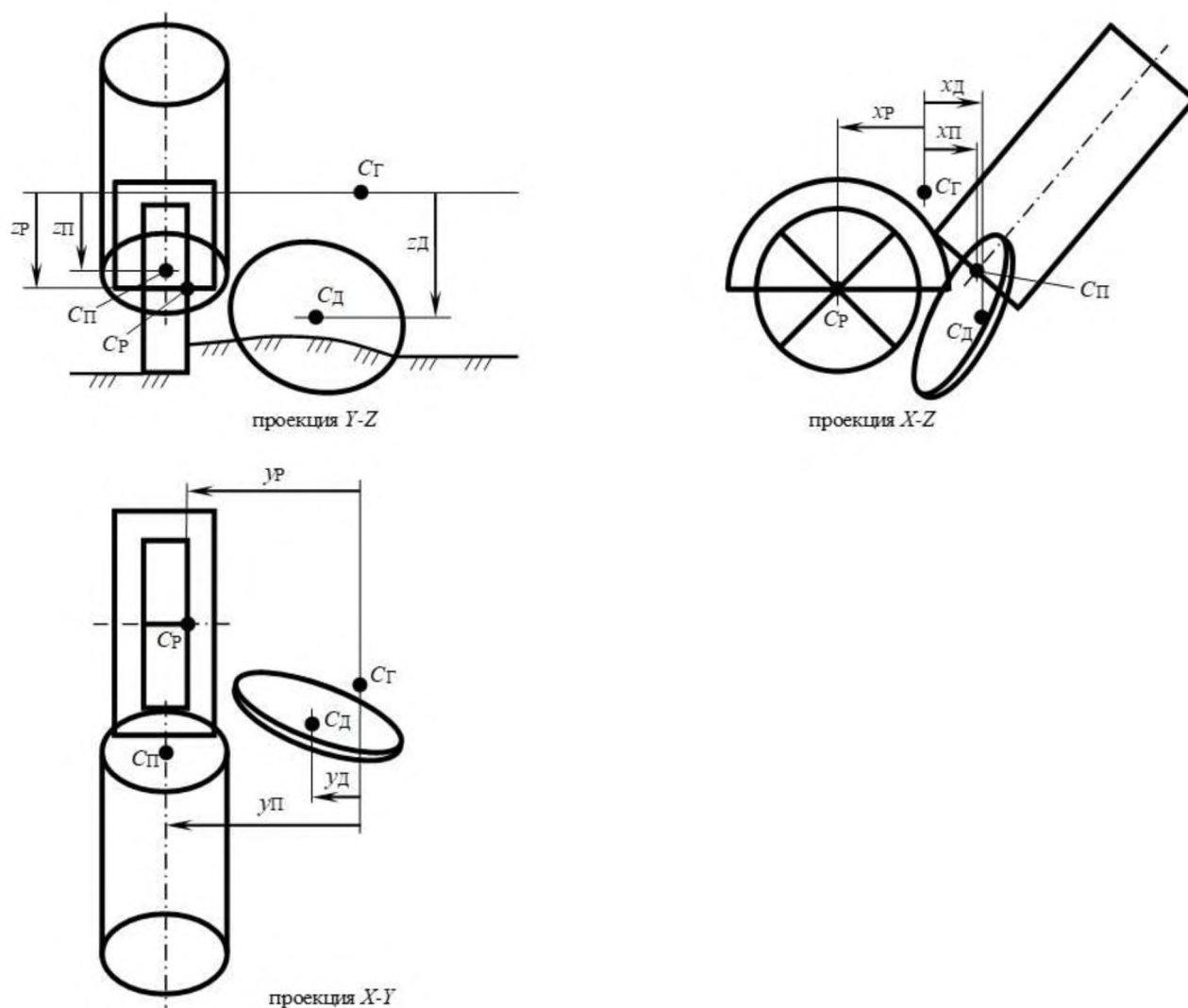


Рисунок 6.4 – Основные компоновочные параметры грунтометательной машины

В имитационной модели грунтометательный механизм задан четырьмя лопатками, описанными в виде прямоугольников (состыкованные происходят по ребрам треугольника). Режущие кромки рабочего органа, как было указано выше, заданы двумя открытыми треугольниками, с задней круговой стенкой

(8 треугольников) для подбора почвенного вала и тем самым увеличения объема метаемого грунта без увеличения площади лопатки (рисунок 6.5, 6.6).

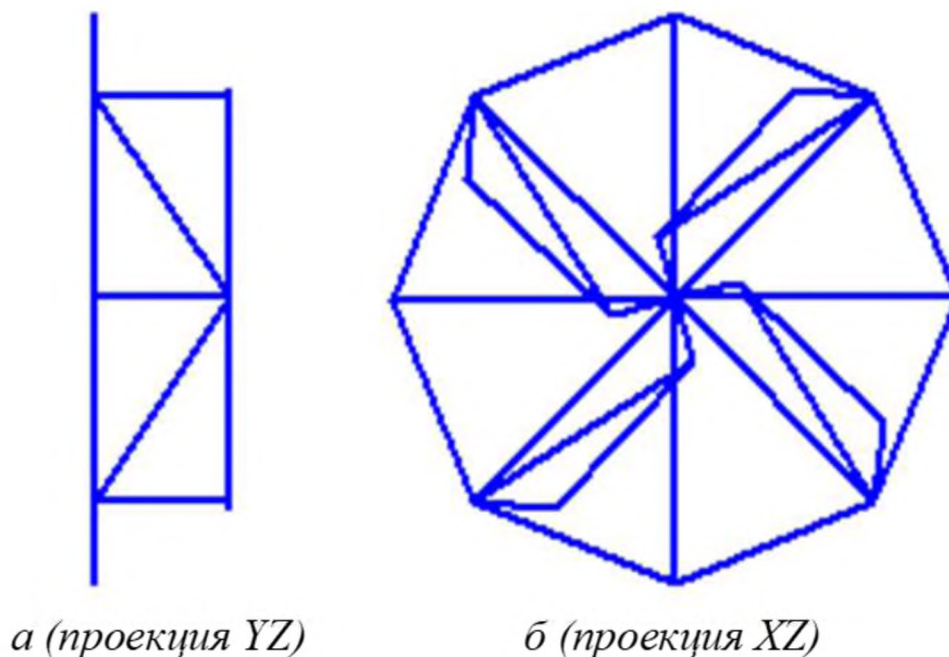


Рисунок 6.5 – Представление в модели грунтометательного механизма (две проекции)

Отличительной особенностью грунтометательного механизма является требуемое вращение относительно своей оси, что выполняется при движении 22 базовых точек рабочего органа. Значение координат точек производятся при помощи выражений:

- базовые точки оси:

$$x_1 = x_{\Gamma} + x_P; \quad y_1 = y_{\Gamma} + y_P; \quad z_1 = z_{\Gamma} + z_P; \quad (6.2)$$

$$x_2 = x_{\Gamma} + x_P; \quad y_2 = y_{\Gamma} + y_P - B_{Л}; \quad z_2 = z_{\Gamma} + z_P;$$

- базовые точки метательных частей лопаток:

$$x_{1+2i} = x_{\Gamma} + x_P + R_P \cos\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$y_{1+2i} = y_{\Gamma} + y_P;$$

$$z_{1+2i} = z_{\Gamma} + z_P + R_P \sin\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right); \quad (6.3)$$

$$x_{2+2i} = x_{\Gamma} + x_P + R_P \cos\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right);$$

$$y_{2+2i} = y_{\Gamma} + y_P - B_{II};$$

$$z_{2+2i} = z_{\Gamma} + z_P + R_P \sin\left(\omega_P t + (i-1)\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right);$$

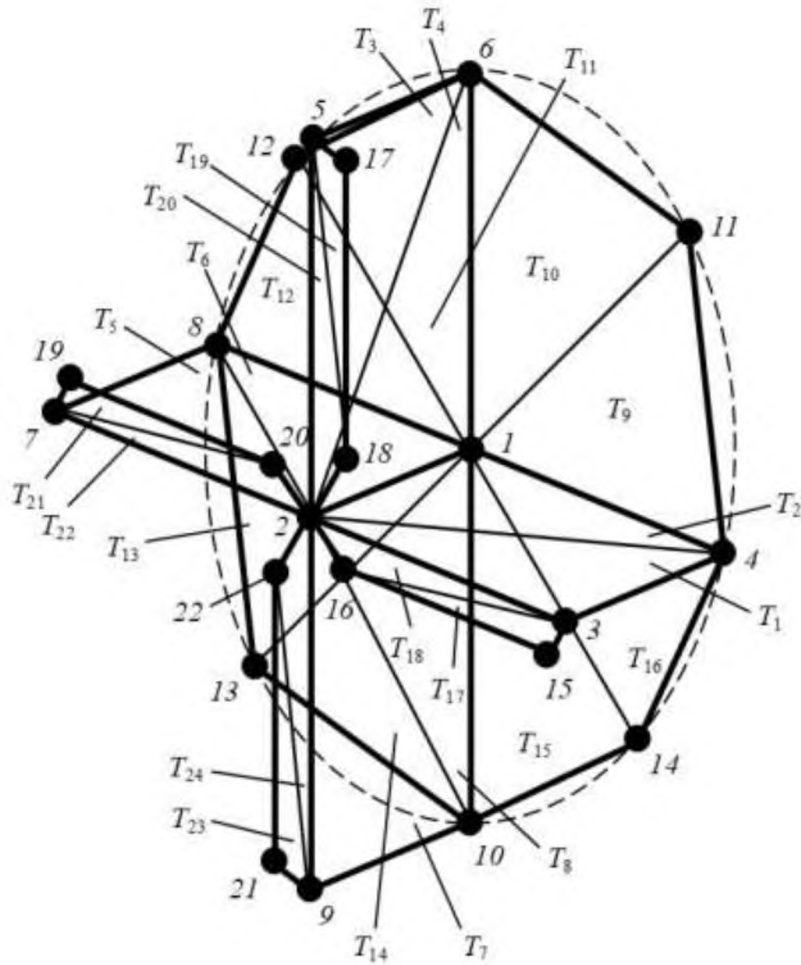


Рисунок 6.6 – Схема индексации базовых точек и элементарных треугольников грунтометательного механизма

- дополнительные базовые точки задней круговой стенки:

$$x_{9+i} = x_{\Gamma} + x_P + R_P \cos\left(\omega_P t + i\frac{\pi}{2}\right);$$

$$y_{9+i} = y_{\Gamma} + y_P - B_{II}; \quad (6.4)$$

$$z_{9+i} = z_{\Gamma} + z_P + R_P \sin\left(\omega_P t + i \frac{\pi}{2}\right);$$

- базовые точки режущих кромок лопаток:

$$x_{13+2i} = x_{\Gamma} + x_P + R_{P1} \cos\left(\omega_P t + (i-1) \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_1\right);$$

$$y_{13+2i} = y_{\Gamma} + y_P;$$

$$z_{13+2i} = z_{\Gamma} + z_P + R_{P1} \sin\left(\omega_P t + (i-1) \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_1\right); \quad (6.5)$$

$$x_{14+2i} = x_{\Gamma} + x_P + R_{P2} \cos\left(\omega_P t + (i-1) \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_2\right);$$

$$y_{14+2i} = y_{\Gamma} + y_P;$$

$$z_{14+2i} = z_{\Gamma} + z_P + R_{P2} \sin\left(\omega_P t + (i-1) \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi_2\right);$$

где $i = 1 \dots 4$ – номер лопатки;

$(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma})$ – координаты условного компоновочного центра базовой грунтометательной машины, м;

x_P, y_P, z_P – смещение грунтометательного механизма относительно центра базовой грунтометательной машины, м;

$B_{\text{Л}}$ – ширина лопатки грунтометательного механизма, м;

R_P – радиус грунтометательного механизма, м;

ω_P – угловая скорость вращения грунтометательного механизма, градусы/с;

t – время, с;

$(R_{P1}, \varphi_1), (R_{P2}, \varphi_2)$ – полярные координаты дальней и ближней точек режущих кромок, принятые в модели равными $R_{P1} = 0,85 R_P, R_{P2} = 0,23 R_P, \varphi_1 = 15^\circ, \varphi_2 = 60^\circ$, соответственно м, градусы;

Рабочие поверхности грунтометательного механизма состоят из совокупности элементарных треугольников:

$T_1(P_1, P_2, P_4), T_2(P_1, P_3, P_4), T_3(P_1, P_2, P_6), T_4(P_1, P_5, P_6), T_5(P_1, P_2, P_8), T_6(P_1, P_7, P_8), T_7(P_1, P_2, P_{10}), T_8(P_1, P_9, P_{10}), T_9(P_2, P_4, P_{11}), T_{10}(P_2, P_8, P_{11}), T_{11}(P_2, P_8, P_{12}),$

$T_{12}(P_2, P_6, P_{12}), T_{13}(P_2, P_6, P_{13}), T_{14}(P_2, P_{10}, P_{13}), T_{15}(P_2, P_4, P_{14}), T_{16}(P_2, P_{10}, P_{14}),$
 $T_{17}(P_1, P_3, P_{16}), T_{18}(P_3, P_{15}, P_{16}), T_{19}(P_1, P_5, P_{18}), T_{20}(P_5, P_{17}, P_{18}), T_{21}(P_1, P_7, P_{20}),$
 $T_{22}(P_7, P_{19}, P_{20}), T_{23}(P_1, P_9, P_{22}), T_{24}(P_9, P_{21}, P_{22}).$

где P_i – обозначение i -й базовой точки.

Подобным порядком грунтометательный механизм в имитационной модели обозначается как 24 треугольника, приводимых в движение с постоянной скоростью, и закрепленный на оси вращения.

Защитный кожух в имитационной модели задан несколькими частями, одна из которых это цилиндр, установленный вокруг грунтометательного механизма (рисунок 6.7). Еще одной особенностью является отсутствующий нижней элемент цилиндра, а верхняя часть переходит в эллиптическую цилиндрическую поверхность почвопровода. Базовые точки защитного кожуха нумеруются, начиная с 301, а почвопровода, – начиная с 501 (рисунок 6.8). При разработке имитационной модели намеренно принята такая нумерация для удобства работы с индексами: для каждой части базовой грунтометательной машины нумерация начинается с $100 \cdot n + 1$. Координаты базовых точек защитного кожуха задавались следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x_{301} &= x_{\Gamma} + x_P; & y_1 &= y_{\Gamma} + y_P + d_K; & z_1 &= z_{\Gamma} + z_P; \\ x_{302} &= x_{\Gamma} + x_P; & y_2 &= y_{\Gamma} + y_P - B_{\text{Л}} - d_K; & z_2 &= z_{\Gamma} + z_P; \\ x_{301+2i} &= x_{\Gamma} + x_P + R_K \cos\left(\pi - (i-1) \frac{\pi}{4}\right); \\ y_{301+2i} &= y_{\Gamma} + y_P + d_K; \\ z_{301+2i} &= z_{\Gamma} + z_P + R_K \sin\left(\pi - (i-1) \frac{\pi}{4}\right); \\ x_{302+2i} &= x_{\Gamma} + x_P + R_K \cos\left(\pi - (i-1) \frac{\pi}{4}\right); \\ y_{302+2i} &= y_{\Gamma} + y_P - B_{\text{Л}} - d_K; \\ z_{302+2i} &= z_{\Gamma} + z_P + R_K \sin\left(\pi - (i-1) \frac{\pi}{4}\right), \end{aligned} \quad (6.6)$$

где $i = 1 \dots 4$;

d_k – боковой просвет между грунтометательным механизмом и поверхностью оснований цилиндра, м;

R_k – радиус цилиндра защитного кожуха, м.

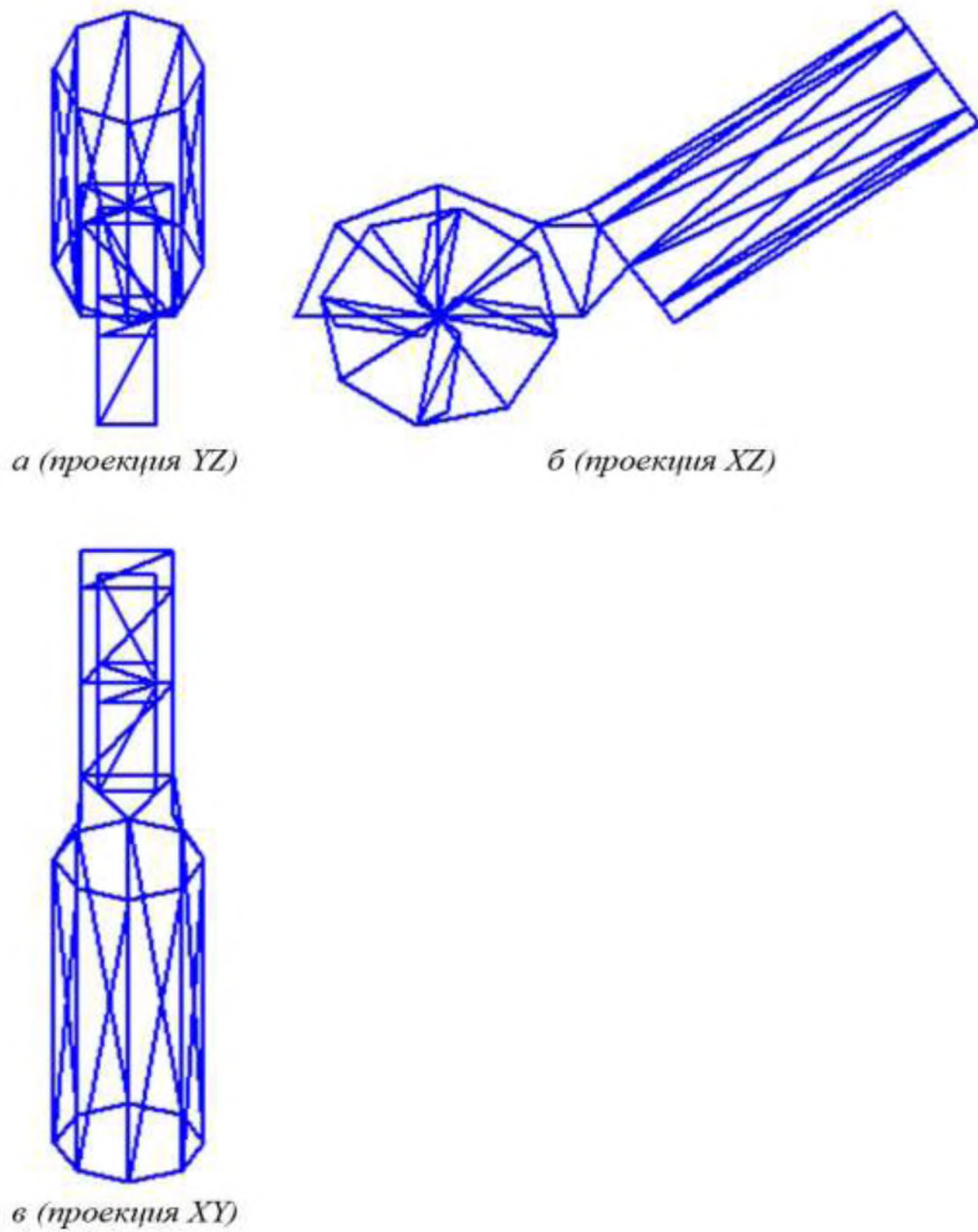


Рисунок 6.7 – Представление в модели защитного кожуха и почвопровода
(три проекции)

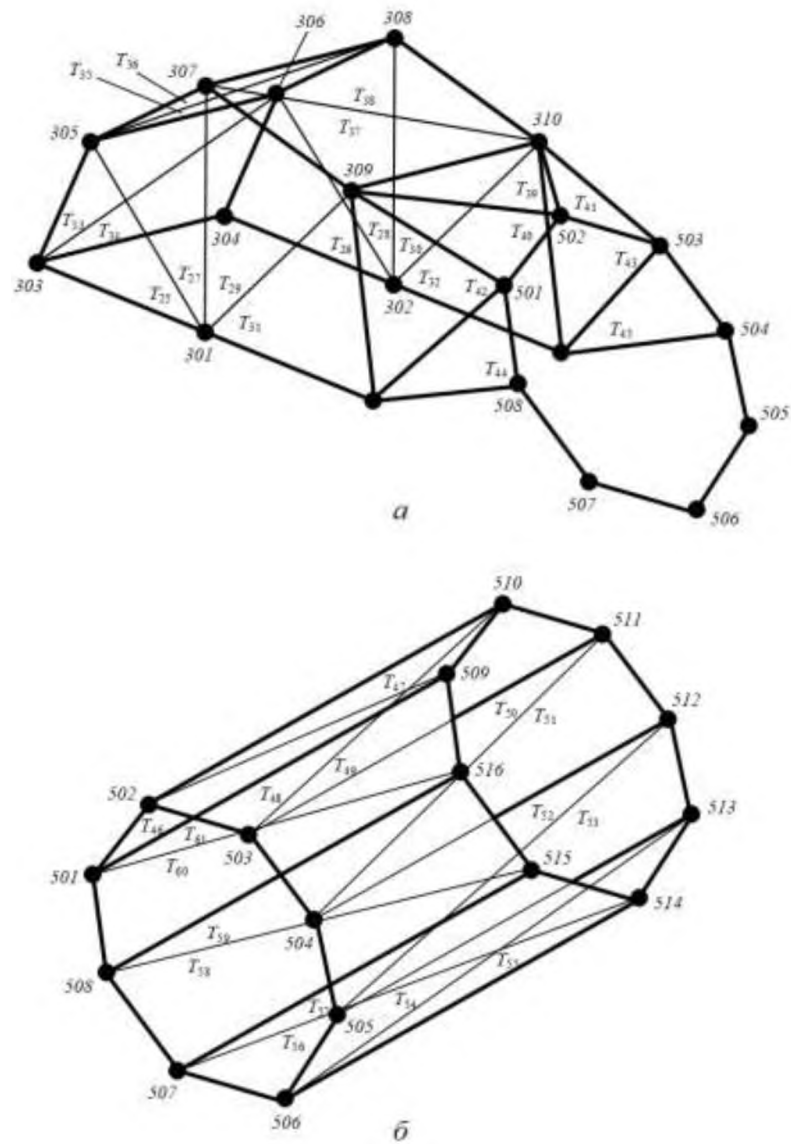


Рисунок 6.8 – Схема индексации базовых точек и элементарных треугольников защитного кожуха (а) и почвопровода (б)

Координаты базовых точек почвопровода предварительно задавались для горизонтального расположения:

$$\begin{aligned}
 x_{500+i} &= x_{\Gamma} + x_{\Pi}; \\
 y_{500+i} &= y_{\Gamma} + y_{\Pi} + R_{\Pi} \cos\left(2\pi \frac{i}{8}\right); \\
 z_{500+i} &= z_{\Gamma} + z_{\Pi} + R_{\Pi} \sin\left(2\pi \frac{i}{8}\right); \\
 x_{508+i} &= x_{\Gamma} + x_{\Pi} + L_{\Pi};
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

$$y_{508+i} = y_{\Gamma} + y_{\Pi} + R_{\Pi} \cos\left(2\pi \frac{i}{8}\right);$$

$$z_{508+i} = z_{\Gamma} + z_{\Pi} + R_{\Pi} \sin\left(2\pi \frac{i}{8}\right);$$

где $i = 1 \dots 8$ – номер грани почвопровода (цилиндрическая поверхность упрощается до призмы с правильным восьмиугольником в основании);

x_{Π} , y_{Π} , z_{Π} – смещение почвопровода относительно центра базовой грунтометательной машины, м;

R_{Π} и L_{Π} – радиус и длина почвопровода, м.

В процессе компьютерной симуляции в опытах задействовали почвопровод эллиптического сечения. С учетом этого основными геометрическими параметрами для задания параметров грунтометательного механизма будут два значения (полуоси эллипса) – a_{Π} и b_{Π} , применяемые в дальнейших расчетах в виде коэффициентов, обозначенных перед косинусами и синусами. В ходе исследований изменяли угол φ_{Π} по координатам XZ :

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{(x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi}))^2 + (z_i - (z_{\Gamma} + z_{\Pi}))^2}; \\ \varphi = \begin{cases} \arctan \frac{z_i - (z_{\Gamma} + z_{\Pi})}{x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi})}, & x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi}) \geq 0; \\ \arctan \frac{z_i - (z_{\Gamma} + z_{\Pi})}{x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi})} + 180^{\circ}, & x_i - (x_{\Gamma} + x_{\Pi}) < 0; \end{cases} \\ x_{i\Pi} = x_{\Gamma} + x_{\Pi} + r \cos(\varphi + \varphi_{\Pi}); \\ y_{i\Pi} = y_i; \\ z_{i\Pi} = z_{\Gamma} + z_{\Pi} + r \sin(\varphi + \varphi_{\Pi}), \end{array} \right. \quad (6.8)$$

где r и φ – полярные координаты базовых точек в системе координат, связанной с точкой размещения почвопровода, соответственно м, градусы;

(x_i, y_i, z_i) и $(x_{i\Pi}, y_{i\Pi}, z_{i\Pi})$ – координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси OY , м.

Защитный кожух и переход в почвопровод состоит из следующих элементарных треугольных поверхностей:

$T_{25}(P_{301}, P_{303}, P_{305})$, $T_{26}(P_{302}, P_{304}, P_{306})$, $T_{27}(P_{301}, P_{305}, P_{307})$, $T_{28}(P_{302}, P_{306}, P_{308})$,
 $T_{29}(P_{301}, P_{307}, P_{309})$, $T_{30}(P_{302}, P_{308}, P_{310})$, $T_{31}(P_{301}, P_{309}, P_{311})$, $T_{32}(P_{302}, P_{310}, P_{312})$,

$T_{33}(P_{303}, P_{305}, P_{306}), T_{34}(P_{303}, P_{304}, P_{306}), T_{35}(P_{305}, P_{307}, P_{308}), T_{36}(P_{305}, P_{306}, P_{308}),$
 $T_{37}(P_{307}, P_{309}, P_{310}), T_{38}(P_{307}, P_{308}, P_{310}), T_{39}(P_{309}, P_{310}, P_{502}), T_{40}(P_{309}, P_{501}, P_{502}),$
 $T_{41}(P_{310}, P_{502}, P_{503}), T_{42}(P_{309}, P_{311}, P_{501}), T_{43}(P_{310}, P_{312}, P_{503}), T_{44}(P_{311}, P_{501}, P_{508}),$
 $T_{45}(P_{312}, P_{503}, P_{504}).$

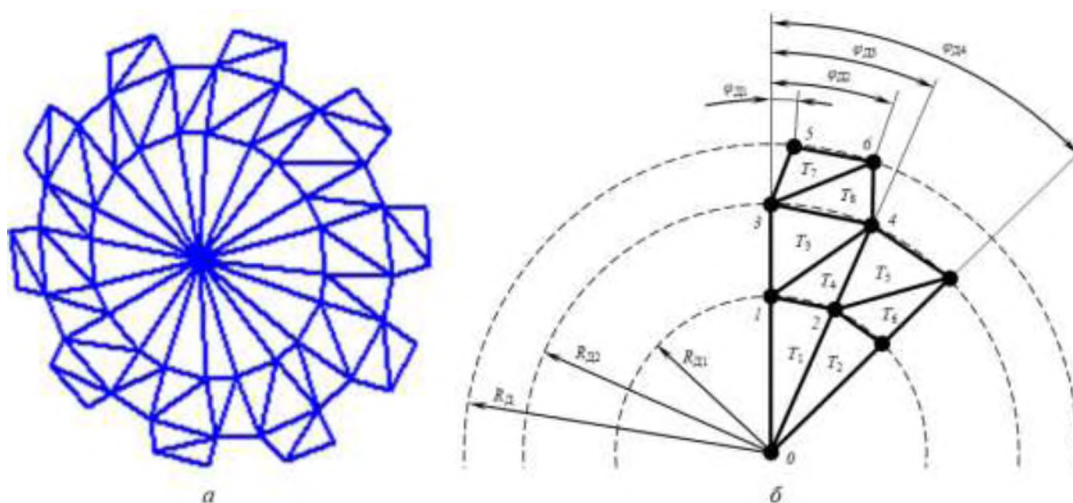
Почвопровод в имитационном исследовании представлен как совокупность 8 элементарных треугольников:

$T_{45+2i-1}(P_{500+i}, P_{500+i+1}, P_{500+i+8}), T_{45+2i}(P_{500+i+1}, P_{500+i+8}, P_{500+i+8+1}), T_{60}(P_{508}, P_{501}, P_{516}),$
 $T_{61}(P_{501}, P_{509}, P_{516}),$

где $i = 1 \dots 7$.

Из этого следует, что суммарное количество элементарных треугольников составит 37 шт, в это значение входит и защитный кожух и почвопровод.

Представление в имитационном исследовании дискового рабочего органа как диск с девятью сегментными вырезами создано при помощи частей диска с повторениями (рисунок 6.9). Например, исследуемый дисковый рабочий орган возможно создать при помощи поворота относительно центральной оси.



а) внешний вид диска, установленного под двумя пространственными углами; б) индексация базовых точек и элементарных треугольников структурного мотива диска

Рисунок 6.9 – Представление в модели сферического диска с вырезами как совокупности элементарных треугольников:

Координаты шести точек структурного мотива задаются следующими выражениями (с учетом поворотной трансляционной симметрии, задаваемой

параметром $i = 1 \dots 10$ и началом нумерации с индекса 401):

$$\begin{aligned}
 x_{400+6(i-1)+1} &= x_{\Gamma} + x_{\mathcal{D}} - x_{\mathcal{D}1}; \\
 y_{400+6(i-1)+1} &= y_{\Gamma} + y_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}1} \cos\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+1} &= z_{\Gamma} + z_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}1} \sin\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+2} &= x_{\Gamma} + x_{\mathcal{D}} - x_{\mathcal{D}1}; \\
 y_{400+6(i-1)+2} &= y_{\Gamma} + y_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}1} \cos\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\mathcal{D}3}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+2} &= z_{\Gamma} + z_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}1} \sin\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\mathcal{D}3}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+3} &= x_{\Gamma} + x_{\mathcal{D}} - x_{\mathcal{D}2}; \\
 y_{400+6(i-1)+3} &= y_{\Gamma} + y_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}2} \cos\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+3} &= z_{\Gamma} + z_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}2} \sin\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+4} &= x_{\Gamma} + x_{\mathcal{D}} - x_{\mathcal{D}2}; \\
 y_{400+6(i-1)+4} &= y_{\Gamma} + y_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}2} \cos\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\mathcal{D}3}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+4} &= z_{\Gamma} + z_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}2} \sin\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\mathcal{D}3}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+5} &= x_{\Gamma} + x_{\mathcal{D}} - x_{\mathcal{D}3}; \\
 y_{400+6(i-1)+5} &= y_{\Gamma} + y_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}} \cos\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\mathcal{D}1}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+5} &= z_{\Gamma} + z_{\mathcal{D}} + R_{\mathcal{D}} \sin\left(\omega_{\mathcal{D}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\mathcal{D}1}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+6} &= x_{\Gamma} + x_{\mathcal{D}} - x_{\mathcal{D}3};
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

$$y_{400+6(i-1)+6} = y_{\Gamma} + y_{\text{Д}} + R_{\text{Д}} \cos\left(\omega_{\text{Д}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\text{Д}2}\right);$$

$$z_{400+6(i-1)+6} = z_{\Gamma} + z_{\text{Д}} + R_{\text{Д}} \sin\left(\omega_{\text{Д}} t + 2\pi \frac{i}{10} + \varphi_{\text{Д}2}\right),$$

где $x_{\text{Д}}$, $y_{\text{Д}}$, $z_{\text{Д}}$ – смещения диска по декартовым осям относительно компоновочного центра базовой грунтометательной машины, м;

$R_{\text{Д}}$ – радиус сферического диска относительно оси вращения (в базовом компьютерном эксперименте принят равным 0,32 м), м;

$R_{\text{Д}1}$ и $R_{\text{Д}2}$ – радиусы окружностей дискретизации диска (соответственно 0,18 и 0,27 м), м;

$x_{\text{Д}1}$, $x_{\text{Д}2}$, $x_{\text{Д}3}$ – смещения окружностей дискретизации в осевом направлении относительно кромки диска (соответственно 0,028, 0,060, 0,085 м), м;

$\omega_{\text{Д}}$ – угловая скорость вращения диска, градусы/с;

$\varphi_{\text{Д}1}$, $\varphi_{\text{Д}2}$, $\varphi_{\text{Д}3}$ – угловая ширина: передней кромки выступа диска, выступа вместе с передней кромкой без задней кромки, полная ширина выступа (соответственно равны 1,8, 9,0, 10,8°), градусы.

Вслед за внесёнными координатами базовых точек выполняется вставка и последовательный поворот дискового рабочего органа в первую очередь на угол β применительно к вертикальной поверхности и на α , но уже относительно поступательного перемещения. Изменение установки дискового рабочего органа на β применительно к вертикальной поверхности выполняется при помощи изменения координатных значений базовых точек:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{(x_i - (x_{\Gamma} + x_{\text{Д}}))^2 + (z_i - (z_{\Gamma} + z_{\text{Д}}))^2}; \\ \varphi = \begin{cases} \arctan \frac{z_i - (z_{\Gamma} + z_{\text{Д}})}{x_i - (x_{\Gamma} + x_{\text{Д}})}, & x_i - (x_{\Gamma} + x_{\text{Д}}) \geq 0; \\ \arctan \frac{z_i - (z_{\Gamma} + z_{\text{Д}})}{x_i - (x_{\Gamma} + x_{\text{Д}})} + 180^{\circ}, & x_i - (x_{\Gamma} + x_{\text{Д}}) < 0; \end{cases} \\ x_{\text{ИИ}} = x_{\Gamma} + x_{\text{Д}} + r \cos(\varphi + \beta); \\ y_{\text{ИИ}} = y_i; \\ z_{\text{ИИ}} = z_{\Gamma} + z_{\text{Д}} + r \sin(\varphi + \beta), \end{array} \right. \quad (6.10)$$

где r и φ – полярные координаты базовых точек в системе координат, связанной

с точкой размещения сферического диска, соответственно m , градусы;
 (x_i, y_i, z_i) и $(x_{iII}, y_{iII}, z_{iII})$ – координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси OY , m .

Выставление дискового рабочего органа на α с учетом оси OZ выполняется при помощи поворота:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{(x_{iII} - (x_{\Gamma} + x_{\Delta}))^2 + (y_{iII} - (y_{\Gamma} + y_{\Delta}))^2}; \\ \varphi = \begin{cases} \arctan \frac{y_{iII} - (y_{\Gamma} + y_{\Delta})}{x_{iII} - (x_{\Gamma} + x_{\Delta})}, & x_{iII} - (x_{\Gamma} + x_{\Delta}) \geq 0; \\ \arctan \frac{y_{iII} - (y_{\Gamma} + y_{\Delta})}{x_{iII} - (x_{\Gamma} + x_{\Delta})} + 180^{\circ}, & x_{iII} - (x_{\Gamma} + x_{\Delta}) < 0; \end{cases} \\ x_{iII2} = x_{\Gamma} + x_{\Delta} + r \cos(\varphi + \alpha); \\ y_{iII2} = y_{\Gamma} + y_{\Delta} + r \sin(\varphi + \alpha); \\ z_{iII2} = z_{iII}, \end{array} \right. \quad (6.11)$$

где $(x_{iII}, y_{iII}, z_{iII})$ и $(x_{iII2}, y_{iII2}, z_{iII2})$ – координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси OZ , m .

По координатам базовых точек создаются элементарные фигуры, которые выполняют роль рабочей плоскости диска с вырезами.

Структурный мотив i ($i = 1 \dots 10$) включает восемь треугольников:

$$\begin{aligned} & T_{61+8(i-1)+1}(P_{400}, P_{400+6(i-1)+1}, P_{400+6(i-1)+2}), T_{61+8(i-1)+2}(P_{400}, P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+1+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+3}(P_{400+6(i-1)+1}, P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+3}), T_{61+8(i-1)+4}(P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+3}, P_{400+6(i-1)+4}), \\ & T_{61+8(i-1)+5}(P_{400+6(i-1)+3}, P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+5}), T_{61+8(i-1)+6}(P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+5}, P_{400+6(i-1)+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+7}(P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+1+6}), T_{61+8(i-1)+8}(P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+1+6}, P_{400+6(i-1)+3+6}). \end{aligned}$$

Из вышеуказанного следует, что сферический диск с вырезами задан в модели 80 элементарными фигурами, соединенными между собой.

6.3. Описание передвижения грунтометательной машины в модельном пространстве

В процессе имитации процессов рабочие органы базовой

грунтометательной машины производят поступательно-вращательное движение в пространстве относительно изначально не подвижной поверхности грунта. Важным аспектом является постоянная корректировка параметров базовых точек треугольников T_{ij} .

где i – номер треугольника;

j – номер вершины.

В рамках приближения при равномерном прямолинейном движении базовой грунтометательной машины вдоль оси OY необходимо изменять все игрековые координаты треугольников

$$y_{ij}^{\tau} = y_{ij}^{\tau-1} + v \cdot \Delta t, \quad (6.12)$$

где y_{ij}^{τ} – координата j -й вершины i -го треугольника на шаге интегрирования τ , м;

v – скорость поступательного движения базовой грунтометательной машины, м/с;

Δt – величина шага интегрирования.

На начальном этапе в процессе имитационного исследования происходит поэтапное заглубление рабочих органов базовой грунтометательной машины и определение равновесия в вертикальном положении. Нулевая точка, расположенная в модели для базовой грунтометательной машины, находится над поверхностью грунта, таким образом, чтобы нижние точки рабочих плоскостей соприкасались с поверхностью грунта. В отрезок времени $t_{\text{заг}}$ машина набирает требуемую величину заглубления рабочих органов. Запись показаний опыта ведется только по достижению базовой грунтометательной машиной равновесного состояния. Модельные грани рабочих органов при поэтапном заглублении контактируют с рабочей средой, заданной в виде сферических частиц, возникают силовые взаимодействия между частицами и рабочими плоскостями. Для более точного описания процесса на рисунке 6.10 графически отражены элементы возможных вариаций контакта частиц грунта с I – с плоскостью; II – с ребром; III – с вершиной.

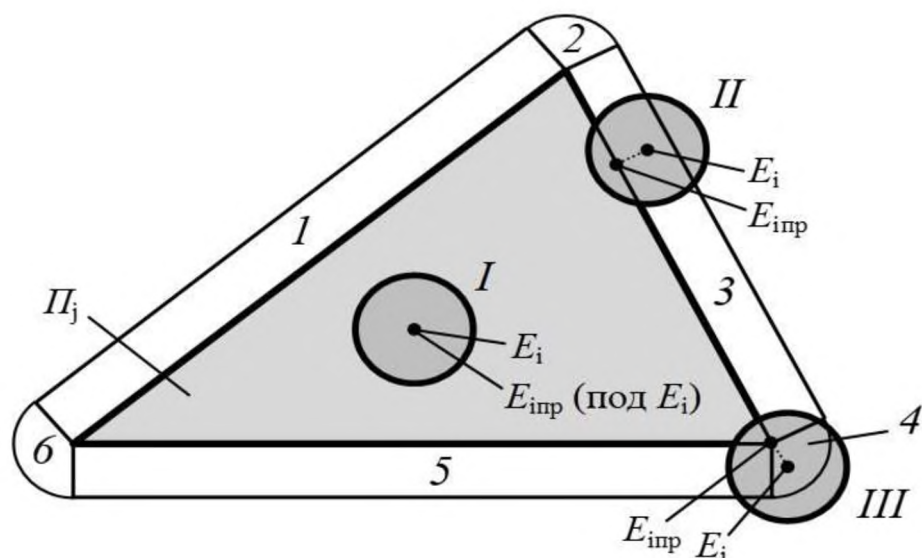


Рисунок 6.10 – Возможные варианты взаимодействия элемента грунта с элементарной треугольной поверхностью рабочих поверхностей базовой грунтометательной машины

При достижении частицей поверхности в точках 1, 3 или 5 она соприкасается с гранью рабочего органа машины, в ситуации контакта в точках 2, 4, 6 – с вершиной треугольной поверхности. Основным требованием для выполнения расчетов сил, которые появляются в процессе выполнения, является разработка математического аппарата, который способен произвести описанные расчеты. В случае реализации контактного взаимодействия нужно определить место соприкосновения частицы: центральной I, ребром II или углом III. Еще одним пунктом следует определить дистанцию $r_i\text{-}\Pi_j$ (частица-поверхность), это позволит отыскать данные силы упругости и сторону приложения сил на отрезке $E_i\text{-}E_{\text{imp}}$.

где E_i и E_{imp} – центр сферы грунта и его проекция на плоскость треугольника.

Описан усложненный алгоритм (рисунок 6.1, вариант I) изыскания контакта элементов грунта с элементарной фигурой Π_j . Для определения верности требуется выполнить ряд уточнений: найти проекцию (x_i, y_i, z_i) для элемента грунта, а также пятно контакта с поверхностью рабочего органа или за его пределами. По значениям точек T_{j1}, T_{j2}, T_{j3} описывается уравнение (6.13):

$$\begin{vmatrix} x - x_{j1} & y - y_{j1} & z - z_{j1} \\ x_{j2} - x_{j1} & y_{j2} - y_{j1} & z_{j2} - z_{j1} \\ x_{j3} - x_{j1} & y_{j3} - y_{j1} & z_{j3} - z_{j1} \end{vmatrix} = 0, \quad (6.13)$$

где x, y, z – координаты произвольной точки, принадлежащей плоскости;

x_{j1}, y_{j1}, z_{j1} – координаты вершины T_{j1} ; x_{j2}, y_{j2} ;

z_{j2} – вершины T_{j2} ; x_{j3}, y_{j3} ;

z_{j3} – вершины T_{j3} .

В процессе нахождения определителя уравнение представляет:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (6.14)$$

где A, B, C, D – коэффициенты уравнения плоскости.

Далее выражение требуется нормировать, разделив все коэффициенты на величину вектора $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$:

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}y + \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}z + \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0. \quad (6.15)$$

В последующих расчетах укажем нормированные коэффициенты при помощи «н», и получим, что нормированное выражение будет иметь вид:

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0. \quad (6.16)$$

Как итог дистанцию $r_{i-Пj}$ от центра частицы (x_i, y_i, z_i) до поверхности элементарной фигуры возможно вычислить:

$$r_{i-Пj} = |A_n x_i + B_n y_i + C_n z_i + D_n|. \quad (6.17)$$

Корректность расчета обусловлена и тем фактом, что в расчете участвуют частицы, только участвующие в контакте с поверхностями рабочих органов, а остальные опускаются до момента вступления в контакт, проверка производится на основе $r_{i-Пj} > d_i/2$, что позволяет снизить временной отрезок для выполнения операции.

Для определения связи между частицей и внутренней поверхностью треугольника (по варианту I) требуется найти проекцию частицы на поверхность выбранного для исследования треугольника. Назначены

параметры координат нормального вектора A_n , B_n и C_n , а так же значение $r_{i-Пj}$ от точки до плоскости, проекция $E_{инп}(x_{инп}, y_{инп}, z_{инп})$, заданная смещением по вектору

$$\begin{aligned}x_{инп} &= x_i - A_n \cdot r_{i-Пj}; \\y_{инп} &= y_i - B_n \cdot r_{i-Пj}; \\z_{инп} &= z_i - C_n \cdot r_{i-Пj}.\end{aligned}\tag{6.18}$$

Исследования соотношения взаимодействия $E_{инп}$ с поверхностью T_j выполнено с учетом характеристик сходства плоскостей треугольников: сумма площадей трех треугольников, созданных в координатных вершинах начального треугольника и точки $E_{инп}$, соответствует характеристике площади всего треугольника T_j

$$S(\Delta T_{j1}T_{j2}T_{j3}) = S(\Delta E_{инп}T_{j2}T_{j3}) + S(\Delta T_{j1}E_{инп}T_{j3}) + S(\Delta T_{j1}T_{j2}E_{инп}).\tag{6.19}$$

Когда сумма площадей треугольников $\Delta E_{инп}T_{j2}T_{j3}$, $\Delta T_{j1}E_{инп}T_{j3}$ и $\Delta T_{j1}T_{j2}E_{инп}$ является больше значения площади треугольника $S(\Delta T_{j1}T_{j2}T_{j3})$, в этом случае точка контакта $E_{инп}$ лежит на плоскости T_j , вследствие обозначенного условия появляется дополнительный шанс взаимодействия с поверхностью треугольника в двух точках по ребру или по вершине. Определение контактного взаимодействия частицы провоцирует активацию сценария расчета взаимодействующих сил по формуле (6.1).

Дифференциальные выражения, определяющие свойства перемещения частиц в имитационной модели, записаны к подобным и их можно описать как

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = k_1 \frac{dx}{dt} + k_2 x + k_3\tag{6.20}$$

или

$$ma = k_1 v + k_2 x + k_3,\tag{6.21}$$

где m – масса элемента, кг;

x – искомая функция (зависимость координаты x , y или z от времени), м;

t – время, с;

k_1, k_2, k_3 – величины, не зависящие от x , но зависящие от других искомым функций системы дифференциальных уравнений соответственно Н·с/м, Н/м, Н;
 a – ускорение (соответствующая декартова компонента a_x, a_y или a_z), м/с²;
 v – скорость (соответствующая декартова компонента v_x, v_y или v_z), м/с.

Результат определения дифференциальных выражений возможно получить при помощи общеизвестного метода Эйлера-Коши, который наиболее часто применяется для решения подобных задач. Решение в данном численном методе записывается следующими выражениями итерационного характера

$$x^{\tau+1} = x^{\tau} + v^{\tau} \cdot \Delta t + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \quad (6.22)$$

$$v^{\tau+1} = v^{\tau} + \frac{k_1 v^{\tau} + k_2 x^{\tau} + k_3}{m} \cdot \Delta t, \quad (6.23)$$

где индексы τ и $\tau+1$ обозначают текущий и последующий шаги интегрирования по времени;

Δt – величина шага интегрирования, с.

Данный метод имеет второй порядок точности по отношению к искомой функции $x(t)$.

В рамках первоначальной системы дифференциальных выражений, взятой за основу обозначающей частицы грунта и позволяющей ввести первоначальные условия, к которым относится скорость частиц вначале и ориентация в пространстве. Это возможно при помощи алгоритма, который фабрикует слои частиц грунта в нижних слоях пространства для имитации. Такое исполнение происходит случайным образом, а каждая частица имеет нулевые скорости. Имитационная модель выполняет требования к устойчивости для системы уравнений по поиску средних значений, например, дальности метания, рассыпания грунтового слоя, толщины метаемого грунта и т.д.

Также необходимо принимать факт контакта частиц грунта в процессе симуляции, который происходит случайным образом. Что вызывает эффект появления и пропадания сил, оказывающих влияние на элементы грунта и на

рабочие плоскости машины. В связи с этим устойчивость отдельных дифференциальных уравнений весьма низка, но в совокупности система обладает необходимой устойчивостью, этот факт объясним тем, что в расчет не берутся первоначальные условия. Имитационная программа выполнена тремя группами выражений для различных координат x , y , z при условии просчета объемной численности элементов грунта (10^3 – 10^5).

Руководствуясь фактом детальности математических расчетов, которые схожи с молекулярной динамикой, и большого количества аналогичных физических и химических процессов, составленная имитационная модель считается не аналитической, а алгоритмической. Что можно определить по формальным признакам степени эффективности, которую невозможно просчитать по выражениям, но можно определить итерационным алгоритмом (рисунок 6.11).

На рисунке схематично при помощи укрупненных блоков изображен алгоритм имитационного моделирования грунтометательной техники в рамках решения поставленных задач:

$t_{кэ}$ – длительность компьютерного эксперимента, с;

$[t_{кэ}/\Delta t]$ – номер последнего шага интегрирования по времени (квадратные скобки означают округление до целого числа).

В результате научного исследования получена математическая модель грунтометательной машины, предусматривающая в расчетах физико-механические особенности лесных грунтов, сложные конструктивные элементы машин, технологические особенности процессов работы, а также контакт грунт-рабочая поверхность. Таким подходом возможно дать оценку эффективности грунтометательной машины с учетом разнообразных условий работы, а также выполнить оптимизацию параметров.

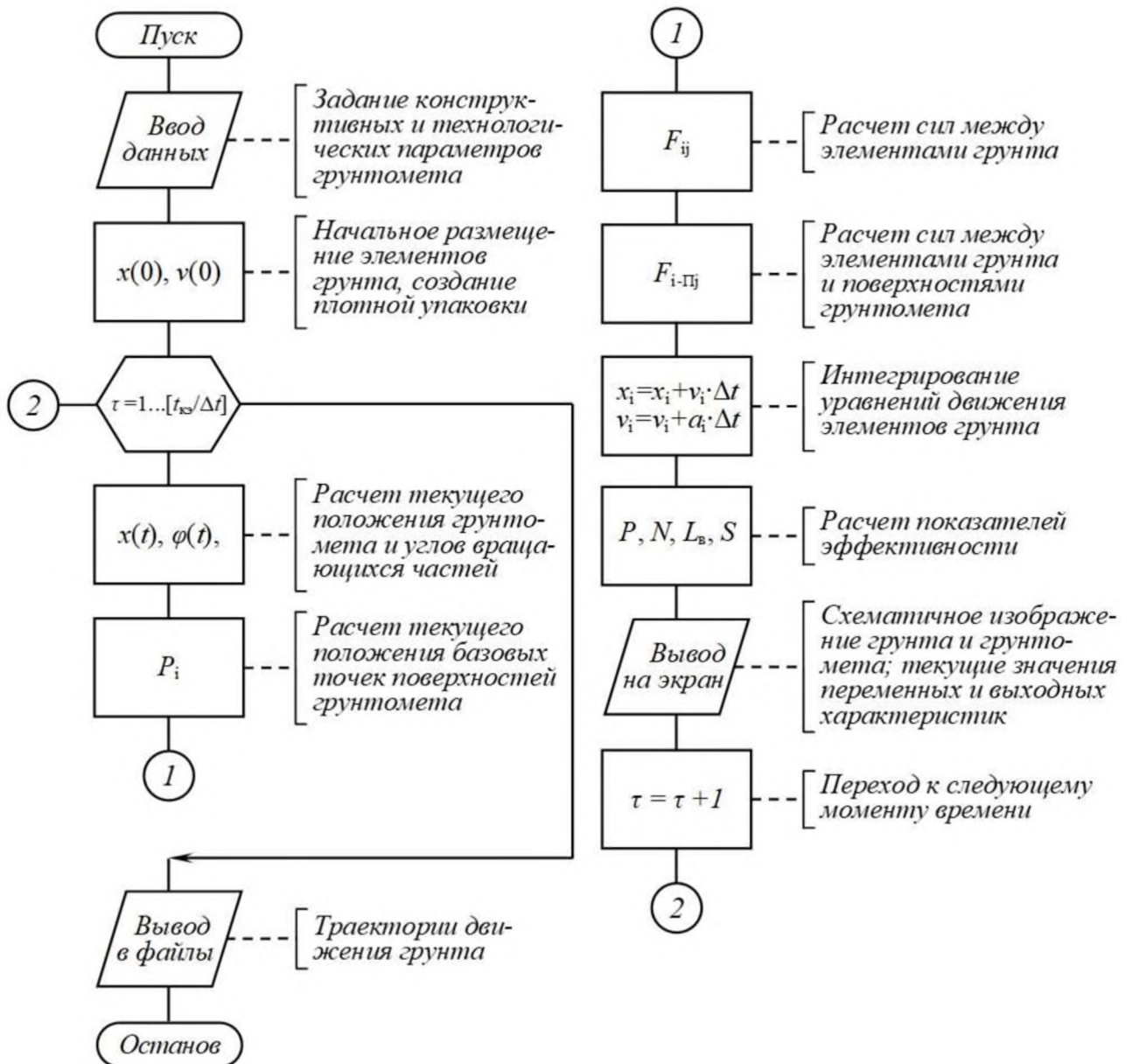


Рисунок 6.11 – Схема алгоритма моделирования грунтометательной машины

На начальном этапе имитационная программа предоставляет возможности внесения индивидуальных параметров машины и рабочей среды, принятой для исследования (рисунок 6.12).

Программа позволяет воспроизвести процессы:

- подготовку грунта дисковыми рабочими органами;
- метание грунта ротором из сформированного вала;
- фокусировку почвенного потока в заданном направлении.

Программа для моделирования машины для тушения лесных пожаров

Программа для моделирования машины для тушения лесных пожаров

<p>Параметры модельного пространства</p> <p>0.5 Длина модели столба (параметр) м</p> <p>0.5 Диаметр модели столба (параметр) м</p> <p>0.0 Высота модели столба (параметр) м</p> <p>0.1 Расстояние от столба до центра м</p>	<p>Геометрические параметры грунта</p> <p>0.53 Начальная высота грунта (начальная высота) м</p> <p>0.03 Расстояние от центра столба до центра грунта м</p> <p>0.20 Расстояние между столбами (0.20 м) м</p> <p>0.00 Расстояние от центра столба до центра грунта м</p> <p>0.05 Ширина столба (параметр) м</p> <p>0.40 Радиус столба м</p> <p>0.00 Площадь поверхности столба м²</p> <p>0.2 Направление оси столба по отношению к горизонту м</p>
<p>Параметры грунта</p> <p>0.00 Коэффициент трения грунта</p> <p>0.00 Диаметр зерна м</p> <p>0.01 Масса зерна кг</p> <p>0.00 Коэффициент пористости грунта м³/м³</p> <p>1 Коэффициент диффузии грунта м²/с</p>	<p>Параметры шкотового управления</p> <p>0.00 Радиус шкотового управления м</p> <p>0.40 Диаметр шкотового управления м</p> <p>0.1 Высота шкотового управления м</p> <p>0.2 Подъемное расстояние от центра столба м</p> <p>0.07 Ширина шкотового управления м</p> <p>0.016 Вес шкотового управления кг</p>
<p>Кинематические параметры грунта</p> <p>0.5 Скорость горения грунта (параметр) м/с</p> <p>4 Частота вращения столба об/с</p> <p>0.6 Частота вращения шкотового управления об/с</p>	

Начать моделирование

Рисунок 6.12 – Форма ввода исходных данных для моделирования в программе «Программа для моделирования машины для тушения лесных пожаров»

Вывод результатов выполняется тремя проекциями с отображением процесса метания грунта, числовые характеристики эффективности работы машины, координатные перемещения элементов грунта, энергетические показатели (рисунок 6.13).

Программа позволяет учитывать большие диапазоны вводимых значений.

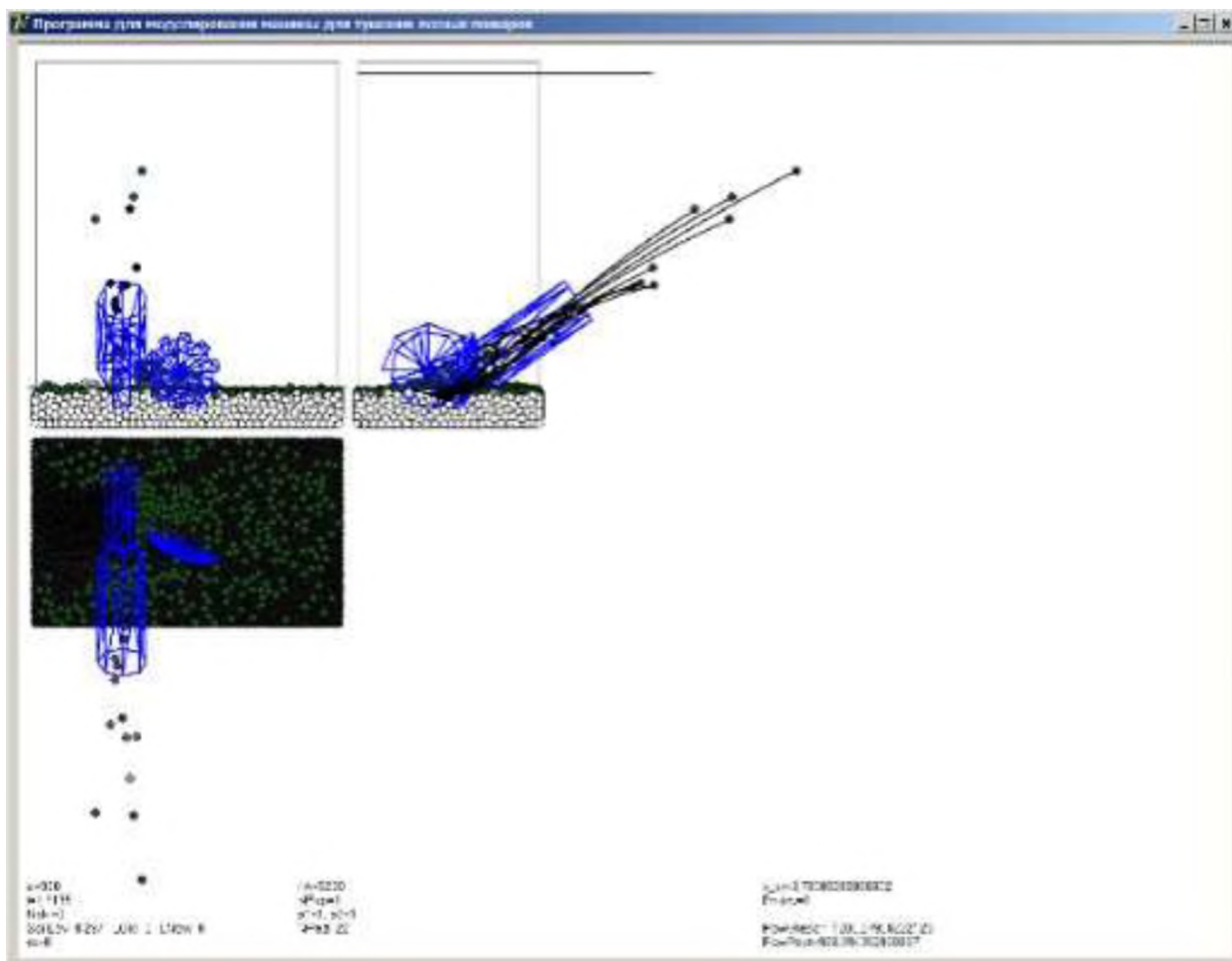


Рисунок 6.13 – Форма вывода результатов моделирования в программе «Программа для моделирования машины для тушения лесных пожаров»

6.4. Теоретическое обоснование параметров грунтометательной машины

Разработанная модель грунтометательной машины позволяет исследовать воздействие более 30 конструктивных и технологических параметров машины и режимов ее применимости на показатели эффективности. Переменные, связанные с моделью грунтометательной машины, можно представить следующей схемой (рисунок 6.14).



Рисунок 6.14 – Входные параметры и показатели эффективности модели грунтометательной машины

К первой группе переменных, характеризующих модель, относятся параметры ротора:

R_p – радиус ротора, с;

ω_p – угловая скорость вращения ротора, градусы/с;

a_p – ширина режущей части лопатки, м;

b_p – ширина метательной части лопатки ротора, м;

γ_p – угол отклонения плоскости метательной части лопатки от тангенциального направления, градусы.

Ко второй группе переменных относятся параметры сферического диска:

R_d – радиус сферического диска относительно оси вращения, м;

R_{d1} , R_{d2} – радиусы окружностей дискретизации диска, м;

φ_{d1} , φ_{d2} , φ_{d3} – угловые параметры выступа диска, градусы;

α – угол атаки диска по отношению к поступательному направлению, градусы;

β – угол атаки установки диска по отношению к вертикали, градусы;

К третьей группе относятся основные условия эксплуатации машины:

v – скорость поступательного движения грунтометательной машины, м/с;

$k_{\text{в}}$ – сила вязкого трения между элементами грунта, а также между элементом грунта и рабочей поверхностью машины, Н·с/м.

Четвертую группу составляют параметры почвопровода:

$R_{\text{П}}$ – радиус почвопровода цилиндрической формы, м;

$L_{\text{П}}$ – длина почвопровода (высота цилиндра), м;

$\varphi_{\text{П}}$ – угол наклона оси почвопровода относительно горизонтальной плоскости, градусы;

$x_{\text{П}}$, $y_{\text{П}}$, $z_{\text{П}}$ – смещения почвопровода относительно центра тяжести грунтометательной машины, м.

Эффективность машины характеризуется четырьмя показателями, которые необходимо определить в ходе теоретического исследования:

$L_{\text{ср}}$ – средняя дальность метания грунта, м;

p_{60} – доля грунта, осаждённого в целевой полосе шириной 60 см, центр которой находится на расстоянии $L_{\text{ср}}$, %;

P – производительность грунтометательной машины (масса грунта, выброшенного за пределы машины в единицу времени), кг/с;

N – средняя мощность, потребляемая машиной, Вт.

Расчёт выходных показателей производится по следующим формулам.

Средняя дальность метания грунта рассчитывается по формуле

$$L_{\text{ср}} = x_{\text{ср}} - \frac{L_X}{2} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{э}}} \begin{cases} x_i, & x_i > L_X; \\ 0, & x_i \leq L_X. \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{э}}} \begin{cases} 1, & x_i > L_X; \\ 0, & x_i \leq L_X. \end{cases}} - \frac{L_X}{2}, \quad (6.24)$$

где $x_{\text{ср}}$ – средняя координата x выброшенных грунтометательной машиной элементов грунта;

$N_{\text{э}}$ – общее количество элементов грунта.

В процессе работы направляемый поток грунта, попадающий по ширине 0,6 м, возможно описать выражением

$$p_{60} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\Theta}} \begin{cases} 1, |x_i - L_{cp}| \leq 0,6/2; \\ 0, |x_i - L_{cp}| > 0,6/2; \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_{\Theta}} \begin{cases} 1, x_i > L_X; \\ 0, x_i \leq L_X. \end{cases}}, \quad (6.25)$$

Показатель производительности машины возможно описать выражением

$$P = \frac{m_{\Gamma}}{t_{K\Theta}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\Theta}} \begin{cases} m_{\Theta}, x_i > L_X; \\ 0, x_i \leq L_X. \end{cases}}{t_{K\Theta}}, \quad (6.26)$$

где m_{Γ} – масса грунта, выброшенного в течение компьютерного эксперимента, кг;
 $t_{K\Theta}$ – длительность компьютерного эксперимента, с.

Среднее значение потребляемой мощности возможно описать выражением

$$N = \frac{A}{t_{K\Theta}} = \frac{\omega}{t_{K\Theta}} \int_0^{t_{K\Theta}} M_{\text{сум}}(t) dt \quad (6.27)$$

где A – работа сил сопротивления вращению ротора в течение компьютерного эксперимента, Дж;

$M_{\text{сум}}(t)$ – суммарный момент сил взаимодействия между элементами грунта и элементарными поверхностями ротора в данный момент времени t , Н·м.

Последующее научное изыскание требует составить диапазоны характеристик машины, при которых наблюдается максимальная эффективность, L_{cp} , p_{60} и P как можно выше, а N – как можно ниже

$$\begin{cases} L_{cp} \rightarrow \max; \\ p_{60} \rightarrow \max; \\ P \rightarrow \max; \\ N \rightarrow \min. \end{cases} \quad (6.28)$$

Еще одним важным требованием является независимость показателей эффективности и условий эксплуатации.

Первые компьютерные эксперименты с разработанной моделью грунтометательной машины показали – исследуемый процесс схож с реальным

процессом (рисунок 6.1). Дистанция, на которую машина позволяет доставлять грунт, в среднем составляет 15 м, часть объема подбрасываемого грунта (около 40 %) при достижении поверхности на заданной дистанции полета оказывается в полосе 0,6 м. Энергетические показатели машины, в частности, производительность составит около 45 кг/с, а требуемая для этого мощность – 9 кВт. Следовательно, машина показывает хорошие результаты для осуществления тушения кромки лесного низового пожара.

Дальнейшее теоретическое исследование заключается в анализе влияния параметров ротора, сферических дисков, почвопровода и условий эксплуатации на показатели эффективности машины.

6.5. Исследование влияния длины почвопровода на качественные и количественные показатели грунтометательной машины

Геометрические показатели почвопровода максимально влияют на качество работы машины, длина влияет на фокусирующую способность и на сопротивление движению грунту. В процессе исследования для определения зависимости качественных показателей от длины почвопровода $L_{\text{П}}$ выполнены компьютерные эксперименты, значения изменяемого параметра составляли от 0,50 до 2,00 м с шагом 0,25 м. Другие параметры были постоянные: угол 45° , диаметр 0,4 м.

В случае если длина почвопровода будет чрезмерно мала 0,5 м и менее, тогда поток грунта, направляемый через него, будет максимально разрозненным (рисунок 6.15, а). Это позволило получить характеристики значения среднего расстояния, на которое грунтомет направляет грунт, данные экспериментов составили около 12 м (рисунок 6.16, а). Фокусировка насыпного грунта по полосе 0,6 м составляет около 25 % (рисунок 6.16, б). Показатель производительности варьируется около 25 кг/с (рисунок 6.16, в).

В случае, когда длина почвопровода составит 2 м и более, процесс движения грунта в воздушном пространстве становится не управляем, что

приводит к перемешиванию и также к чрезмерно высокому разлету по ширине (рисунок 6.15, *в*). Вследствие чего кучность составит около 15 % (рисунок 6.16, *б*). Сила трения частиц о почвопровод в значительной степени гасит скорость, что уменьшает дальность метания, которая составляет около 8 м (рисунок 6.16, *а*).

Эффективной будет величина 0,9 ... 1,2 м длины почвопровода, в данном случае поток грунта будет метаться с минимальным показателем разброса и высокой начальной скоростью (рисунок 6.15, *б*). Также параметр дальности варьируется на величине около 15 м, с 40 % попаданием в ширину 0,6 м, а производительность составит 38 ... 42 кг/с.

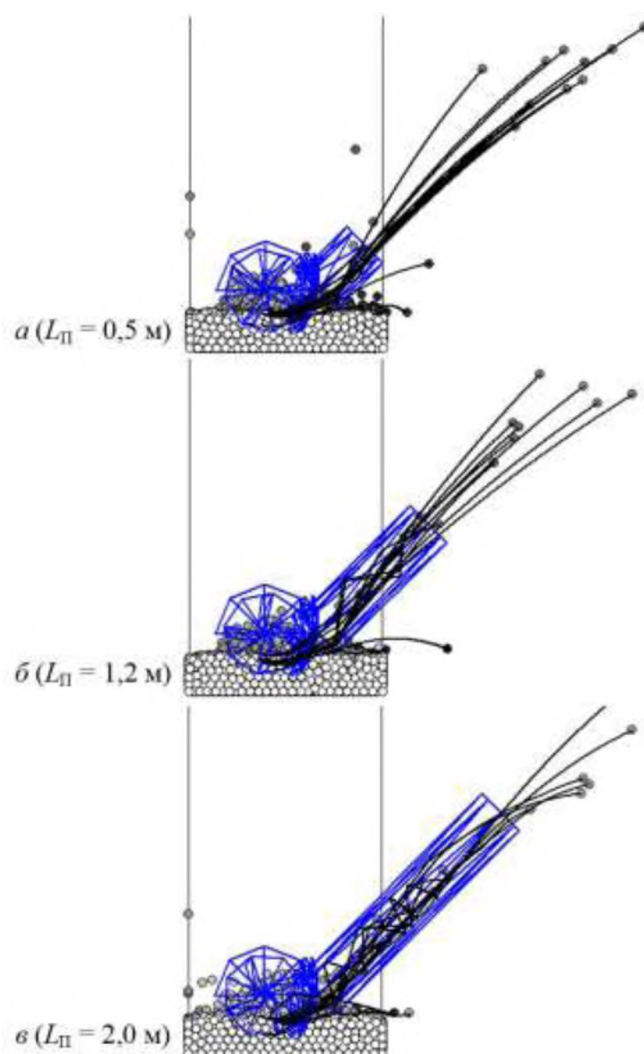


Рисунок 6.15 – Характер выброса грунта при различной длине почвопровода

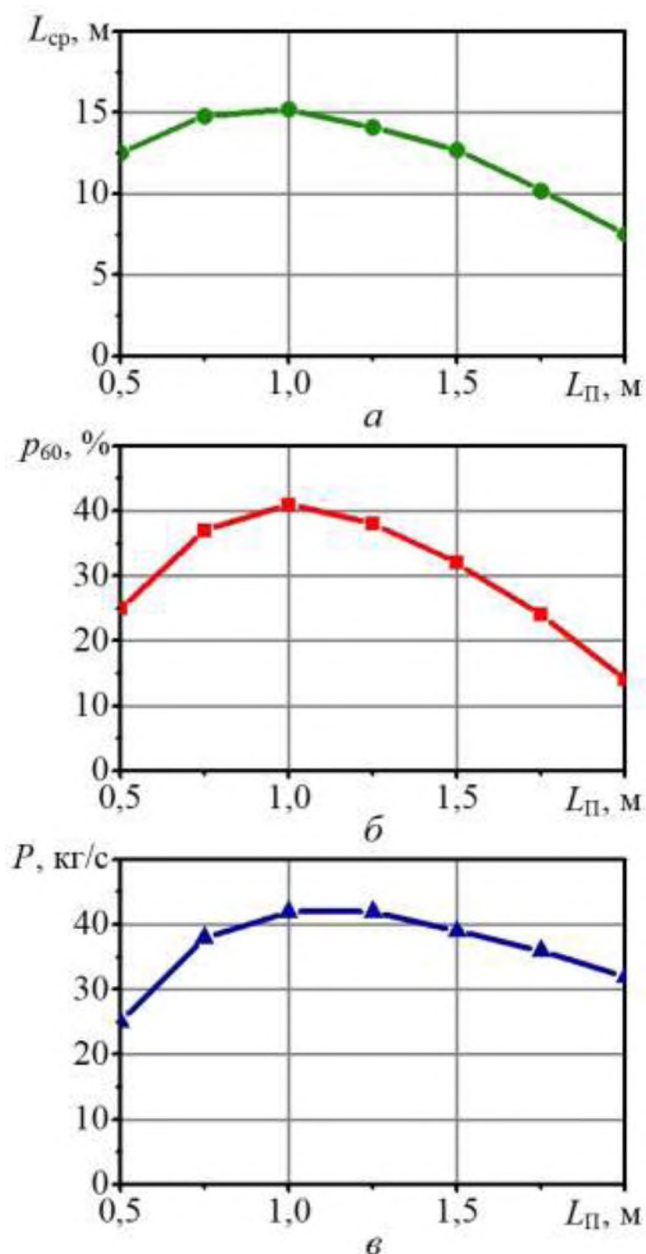


Рисунок 6.16 – Влияние длины почвопровода $L_{\text{П}}$ на среднюю дальность метания грунта $L_{\text{ср}}$, долю грунта в полосе шириной 0,6 м p_{60} и производительность грунтометательной техники P

6.6. Исследование влияния диаметра почвопровода на качественные и количественные показатели грунтометательной машины

Еще одним важным геометрическим показателем является диаметр почвопровода $D_{\text{П}}$, который влияет на кучность метаемого потока грунта, параметр сопротивления полету грунта и полноту захвата грунта фрезой-

метателем.

В процессе исследования определены зависимости качественных показателей от диаметра почвопровода $D_{\text{П}}$ и выполнены компьютерные эксперименты, значения изменяемого параметра составляли от 0,2 до 0,6 м с шагом 0,1 м. Выявлено, что маленький диаметр почвопровода 0,2 м и менее не позволяет фокусировать поток грунта (рисунок 6.17, *a*). Следует принимать во внимание, что дальность метания будет очень мала и составит не более 6 м, а кучность грунта в полосе – не более 13 %, такие цифры обозначают, что поток частиц грунта не позволит потушить лесной пожар, а показатель производительности при этом составит 43 кг/с (рисунок 6.18).

В обратном случае, когда величина диаметра почвопровода 0,6 м и более, объем грунта от лопастей фрезерно-метательного рабочего органа вместе с элементами обладающими наименьшей скоростью направляется в почвопровод, это приводит к хаотизированию и уменьшению скорости метания что ведет к повышению разлета частиц в целевой полосе (рисунок 6.17). Это снижает геометрическую и реологическую фокусирующую способность. Как следствие это приводит к низким показателям эффективности: дальность метания не более 9 м, 37 % грунта попадает в требуемый диапазон, а производительность около 37 кг/с.

Теоретические исследования, выполненные в процессе имитации процесса, показали, что эффективным будет диаметр почвопровода 0,4 м, который позволит направлять грунт на дистанцию 15 м, самый большой объем грунта в полосе составит 41 %, а производительность будет на уровне 42 кг/с.

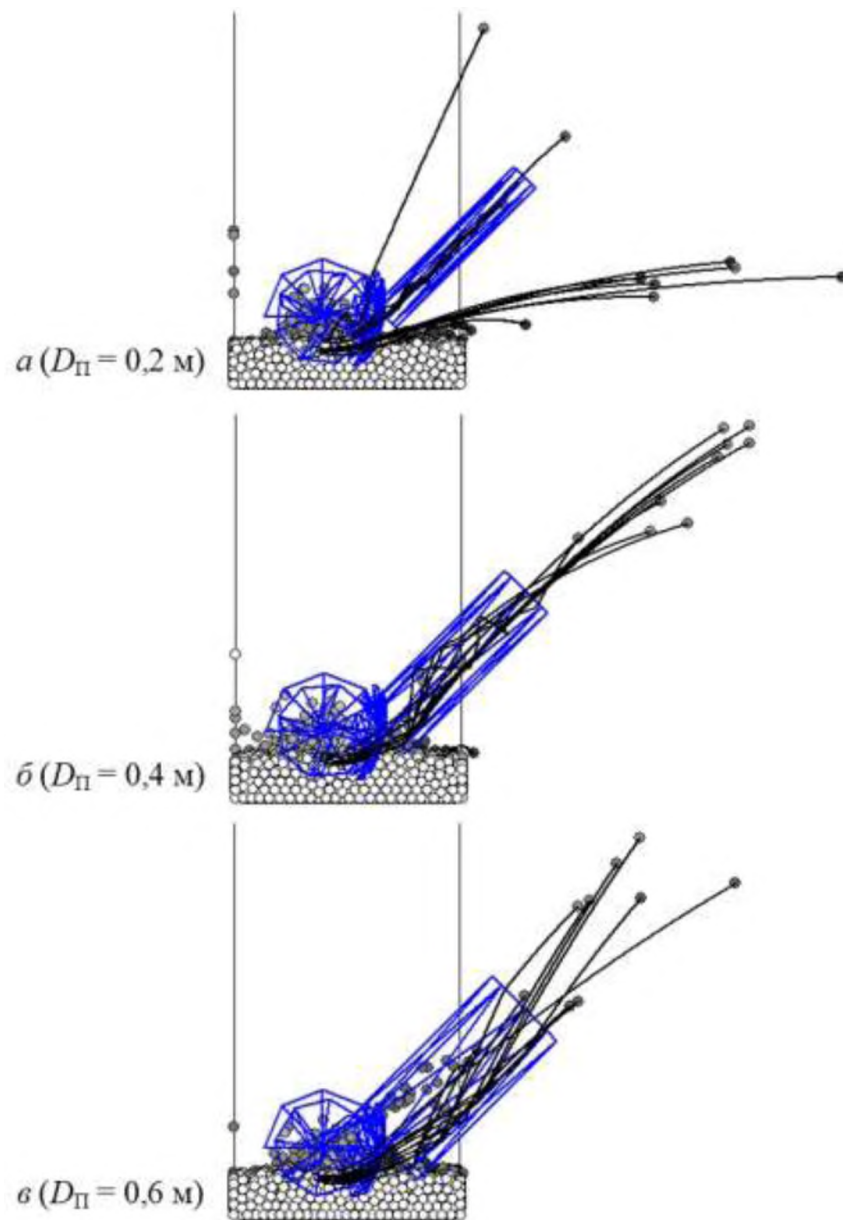


Рисунок 6.17 – Характер выброса грунта при различном диаметре почвопровода

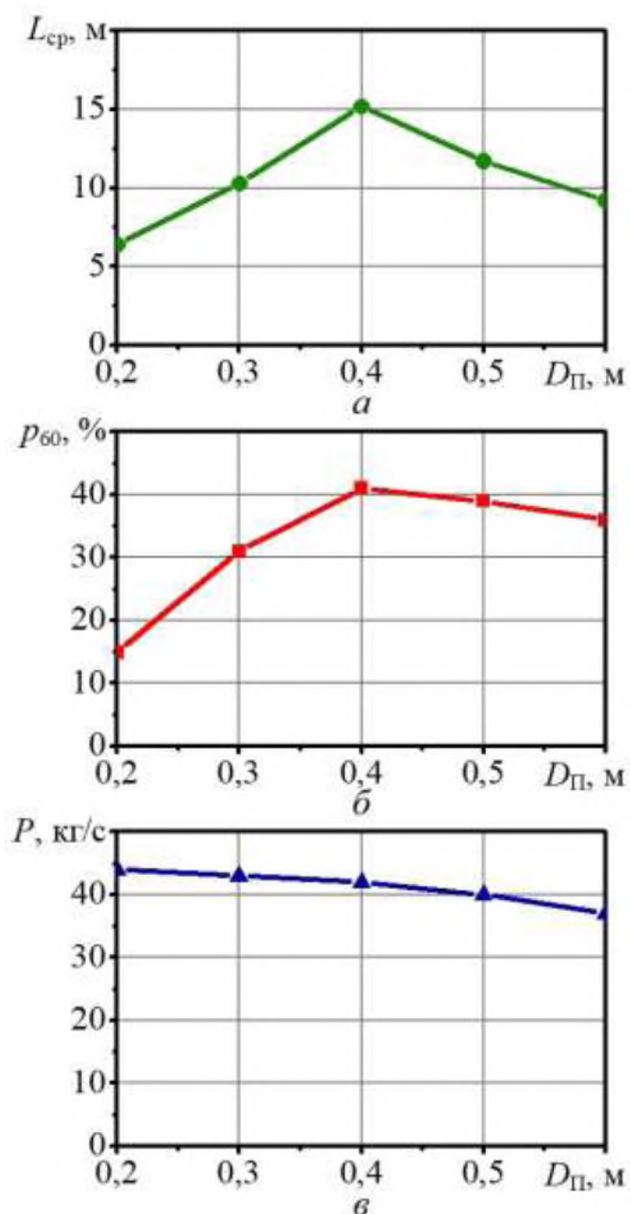


Рисунок 6.18 – Влияние диаметра почвопровода $D_{П}$ на среднюю дальность метания грунта $L_{ср}$, долю грунта в полосе шириной 0,6 м p_{60} и производительность грунтометательной машины P

6.7. Исследование влияния угла наклона и высоты расположения почвопровода

Технологический процесс качественной работы базовой грунтометательной машины относится к сложно моделируемым и

описываемым процессам, зависящим от большого количества факторов. В данной главе рассматриваем почвопровод. Угол установки относительно поверхности земли является основным углом, от установки которого зависят начальный угол полета потока грунта и последующий этап перемещения в воздухе по параболической траектории.

Поток частиц грунта в воздухе максимально напоминает параболическую траекторию в том случае, когда летящие элементы обладают большой массой и плотностью. В случае проведения экспериментов в вакууме, наибольшей эффективности достигнет машина при угле 45° к горизонту. В наших условиях, с противодействующими силами воздуха для достижения максимальной эффективности, достаточной сфокусированности потока, когда регулировочный угол вылета будет отличаться от идеального значения.

Для более точного выявления оптимального параметра установки угла почвопровода $\varphi_{\text{п}}$ была составлена серия тестовых экспериментов с изменением параметра регулировки угла 30° , 45° , 60° , проведение серии опытов позволило найти максимально эффективные параметры угла наклона, влияющие на эффективность процесса метания грунта базовой грунтометательной машиной.

Для решения поставленной задачи в плане эксперимента была введено изменение высоты регулировки почвопровода, такой подход позволил выполнить двухфакторную оптимизацию. Числовые значения показателей эффективности анализируются при решении оптимизационной задачи, поэтому в данном пункте проведём анализ фактов на качественном уровне. В случае установки недостаточно угла почвопровода 30° и ниже в отношении земли к горизонту, поток грунта обладает недостаточным углом для полета, это пагубно сказывается на дальности метания (рисунок 6.19, а).

Еще одной особенностью является хаотизирование потока грунта за счет того, что весь поднятый грунтометательным механизмом объем грунта направляется в почвопровод, возникает эффект смешивания скоростей частиц, что оказывает отрицательный эффект на кучность метания.

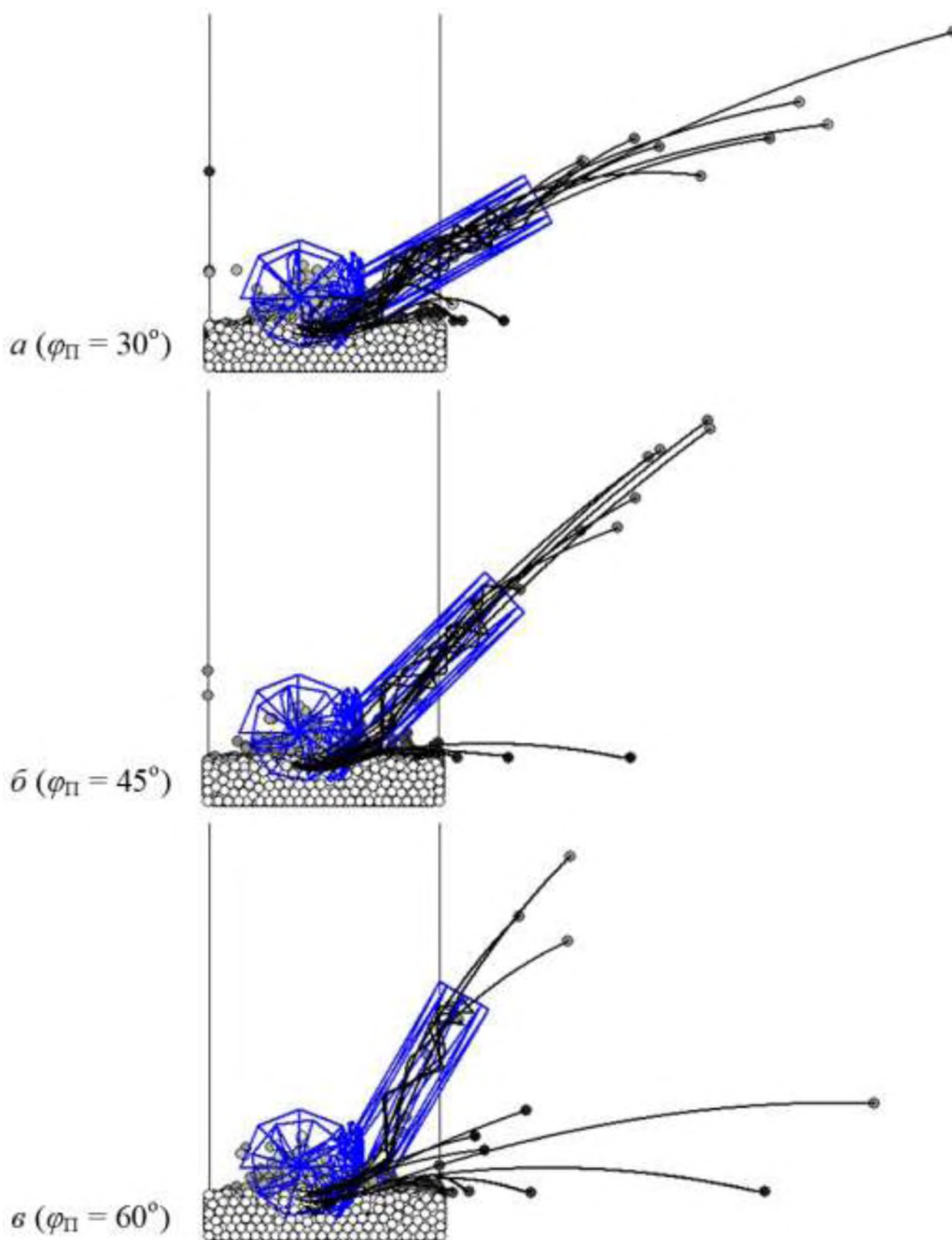


Рисунок 6.19 – Характер выброса грунта при различном угле наклона почвопровода

В случае если угол регулировки почвопровода составит 60° и более, проходной канал становится весь узким, что приводит к забору лишь 40 % поднятого фрезой-метателем грунта (рисунок 6.19, в).

Значительный объем грунта попадает под почвопровод и формируется в виде полосы на малом удалении от машины. Также большой начальный угол потока грунта не позволяет направлять грунт на дальнюю дистанцию, что

становится причиной большого разлета частиц в зоне приземления. Максимальная эффективность достигается при установке угла почвопровода 45° (рисунок 6.19, б). Когда установлен угол 45° , машина обеспечивает максимальный объем поднимаемого фрезой-метателем грунта и придает потоку оптимальную траекторию (баллистическую) движения в воздушном пространстве.

В процессе выполнения двухфакторной оптимизации была выявлена зависимость высоты установки z_{Π} и угла наклона почвопровода, в серии экспериментов значение параметра варьировали 0.2, 0.4, 0.6 м.

Внесение изменений в показатель высоты установки почвопровода приводит к хаотизации потока грунта и забора различных элементов потока. Вследствие изменений смещаются точки контакта потока грунта со стенками почвопровода с внутренней стороны, из-за чего меняется траектория движения грунта. Если угол установлен на очень малое значение, в данном случае поток грунта, попадающий в почвопровод, направляется под низким углом к горизонту (рисунок 6.20, а). Так как в данном случае происходит разделение потока, то часть грунта разлетается о кромку и верхнюю часть почвопровода. Низко поданный поток грунта ударяется о стенки почвопровода под углом, который формирует дополнительный поток, тем самым создавая отрицательный эффект. В данном случае снижается скорость потока из-за неэффективных углов регулировки. Так как поток дважды отражается от стенок, происходит сильное распыление частиц и уменьшение кучности в зоне контакта с поверхностью лесного пожара.

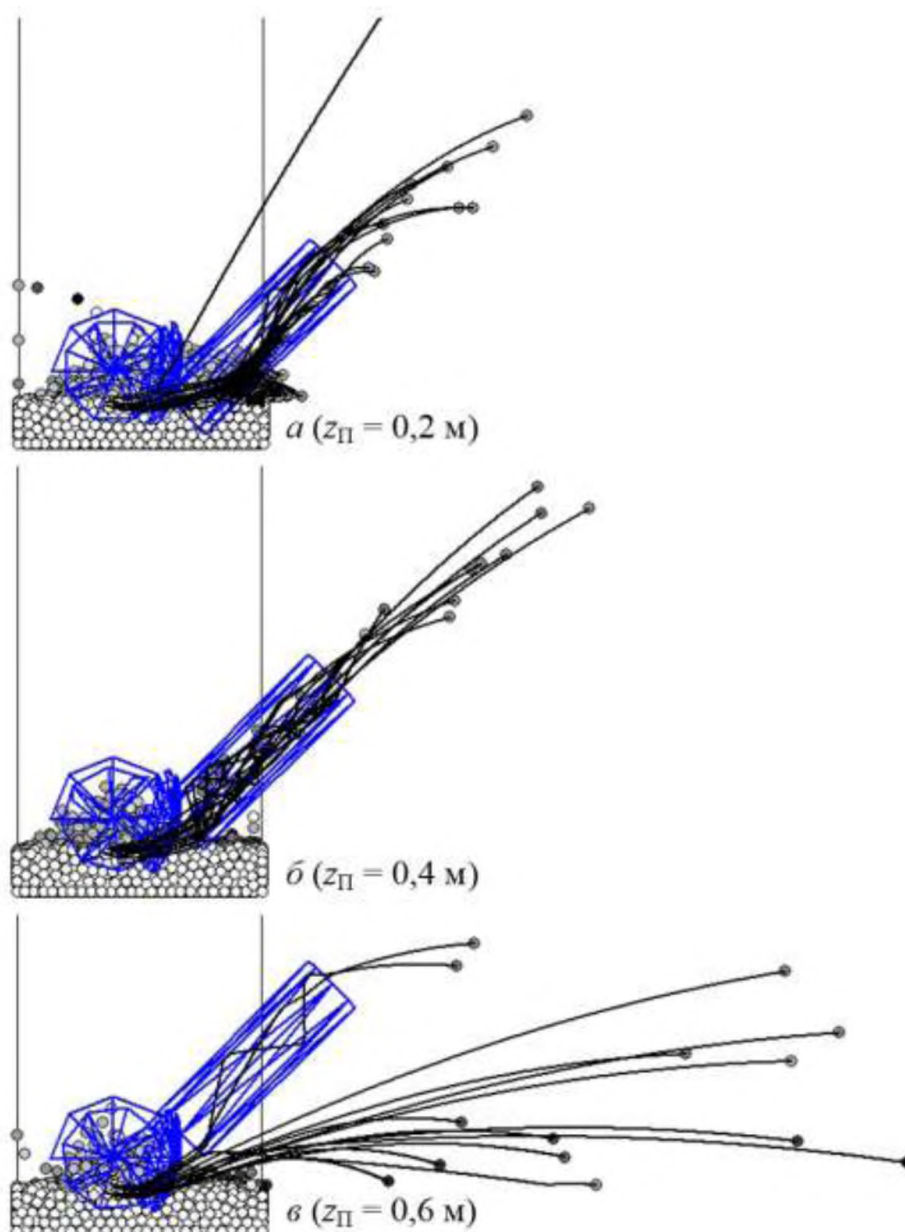


Рисунок 6.20 – Характер выброса грунта при различной высоте размещения почвопровода

В случае установки высокого угла почвопровода поток грунта в большом объеме не направляется в отверстие почвопровода (рисунок 6.20, в). Такой результат схож с показателями грунтометательных машин, не имеющих почвопровода, в данном случае дальность метания минимальна, а расфокусировка потока в зоне осаждения велика. В случае если задачей является создание только минерализованной полосы, такого исполнения машины будет достаточно. Для тушения кромки лесного пожара с отсыпаемой

полосой грунта шириной 0,6 м на расстоянии 15 м обязательным требованием является установка почвопровода.

Наиболее приемлемой с точки зрения эффективности будет высота закрепления почвопровода на уровне 0,4 м (рисунок 6.20, б). Установленный параметр на этот уровень показывает, что большая часть потока грунта, поднятого фрезой-метателем, направляется в указанную область, а оцениваемые показатели начальной скорости и кучность обладают высокими результатами. В связи с тем, что частицы отскакивают от внутренней части почвопровода под малыми углами, происходит сохранение энергии, из-за чего перемешивание слоев минимально. Такие показатели установки почвопровода позволяют получить высокие результаты работы машины: 40 % метаемого грунта попадает в заданный периметр в 0,6 м по ширине насыпи, на удалении от машины в 15 м.

6.8. Оптимизация параметров размещения почвопровода

Выше рассмотрено влияние отдельных конструктивных параметров на показатели эффективности грунтометательной машины. Однако большую результативность дают изменения сразу нескольких параметров работы машины, что открывает возможность для выполнения многофакторной оптимизации машины, а также условий эксплуатации.

Достижение установленной задачи возможно только при сужении количества параметров до показателя в два значения, но в то же время дающих высокую результативность на эффективность работы: угол φ_{II} и высота z_{II} . Выражение (6.29) наиболее точно описывает поставленную задачу

$$\begin{cases} L_{cp}(\varphi_{II}, z_{II}) \rightarrow \max; \\ P_{60}(\varphi_{II}, z_{II}) \rightarrow \max; \\ P(\varphi_{II}, z_{II}) \rightarrow \max; \end{cases} \Rightarrow \varphi_{II}^{opt}, z_{II}^{opt}. \quad (6.29)$$

Нахождение оптимального значения состоит в сопоставлении результатов исследования при изменении параметров φ_{II} и z_{II} , должны быть предельными

показатели средней дальности метания L_{cp} , и объем грунта p_{60} в требуемой полосе шириной 60 см и производительность P .

Нахождение двухфакторной задачи оптимизации сделали по плану эксперимента с 9 повторами с изменением φ_{II} при значениях $35^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ с изменением z_{II} на показатели 0,3, 0,4, 0,5 м.

В качестве списка показателей по итогу выполнения серии опытов выведены аналитические выражения для $L_{cp}(\varphi_{II}, z_{II})$, $p_{60}(\varphi_{II}, z_{II})$ и $P(\varphi_{II}, z_{II})$. Выражения аппроксимировали полиномами второго порядка в виде

$$K(\varphi_{II}, z_{II}) = k_1 \varphi_{II}^2 + k_2 z_{II}^2 + k_3 \varphi_{II} \cdot z_{II} + k_4 \varphi_{II} + k_5 z_{II} + k_6, \quad (6.30)$$

где K – критерий оптимизации (L_{cp} , p_{60} или P), соответственно м, % или кг/с; $k_1 \dots k_6$ – параметры полинома, размерность определяется отношением размерности соответствующего критерия оптимизации к размерности множителя параметра.

Величина полиномов найдена на основании решения методом МНК.

$$\sum_{i=1}^{N_{KЭ}} (K_{\text{аналит}}(\varphi_{II}^i, z_{II}^i) - K_{KЭ}^i(\varphi_{II}^i, z_{II}^i))^2 \rightarrow \min, \quad (6.31)$$

где i – порядковый номер;

$N_{KЭ}$ – общее количество компьютерных экспериментов;

$K_{\text{аналит}}$ – искомая аналитическая (полиномиальная) зависимость критерия K от факторов φ_{II} и z_{II} , размерность м, % или кг/с определяется типом критерия;

$K_{KЭ}^i$ – значения критерия K , определенные в i -м компьютерном эксперименте с параметрами φ_{II}^i и z_{II}^i , размерность м, % или кг/с определяется типом критерия.

Решение поставленной задачи методом МНК стало возможно при помощи индивидуального математического аппарата, что позволило найти описанные ниже выражения, отражающие основные показатели эффективности машины

$$u(D_{BЭ}, \alpha_{BХ}) = -3,833 \cdot 10^{-4} D_{BЭ}^2 - 1,422 \cdot 10^{-3} \alpha_{BХ}^2 + 1,00 \cdot 10^{-4} D_{BЭ} \cdot \alpha_{BХ} + 0,034 D_{BТ} + 0,032 \alpha_{BХ} - 0,192; \quad (6.32)$$

$$\Delta P_0(D_{BЭ}, \alpha_{BХ}) = 1,667 \cdot 10^{-5} D_{BЭ}^2 + 1,274 \cdot 10^{-4} \alpha_{BХ}^2 + 1,133 \cdot 10^{-4} D_{BЭ} \cdot \alpha_{BХ} - 5,483 \cdot 10^{-3} D_{BТ} - 0,011 \alpha_{BХ} + 0,401, \quad (6.33)$$

где φ_{II} измеряется в градусах,

z_{Π} – в метрах,

$L_{\text{ср}}$ – в метрах;

p_{60} – в процентах;

P – в килограммах в секунду.

Найденные выражения употребляются в качестве метода быстрой оценки (когда не проводятся опыты) характеристик эффективности машины с учетом входных данных регулировочных параметров почвопровода.

Для дальнейшего анализа функции $L_{\text{ср}}(\varphi_{\Pi}, z_{\Pi})$, $p_{60}(\varphi_{\Pi}, z_{\Pi})$ и $P(\varphi_{\Pi}, z_{\Pi})$ представлены в виде графиков (рисунок 6.21) и картограмм (рисунок 6.22).

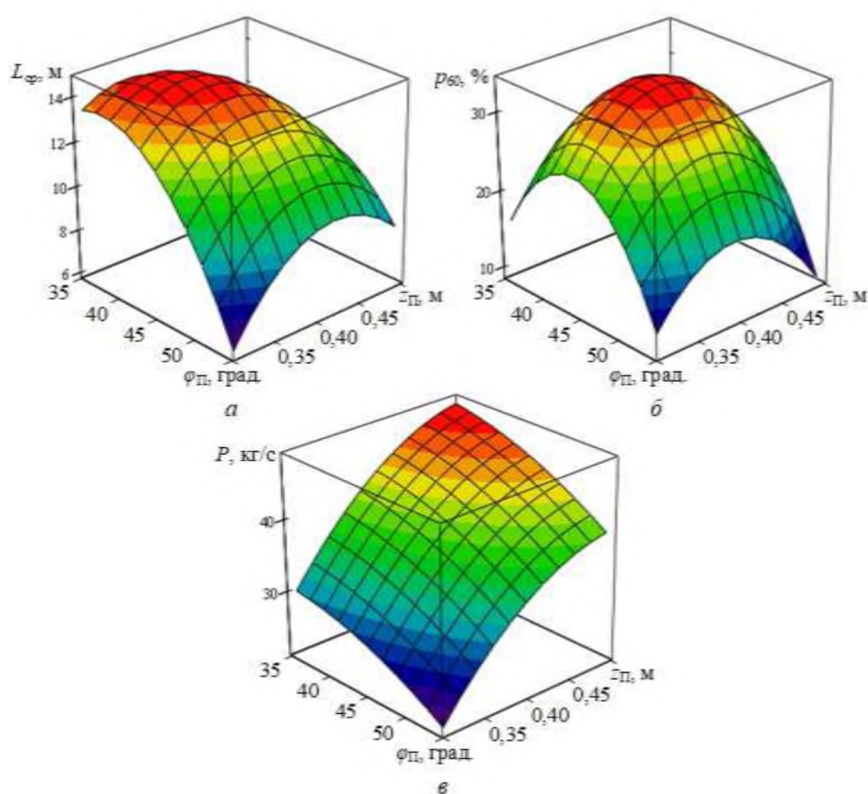


Рисунок 6.21 – Зависимость влияния угла φ_{Π} и высоты z_{Π} установки почвопровода на среднюю дальность метания грунта $L_{\text{ср}}$, долю грунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность грунтометательной машины P

Полученные данные, перенесенные в графический вид, дают возможность визуализировать и описать показатели влияния параметров

установки почвопровода, влияющие на эффективность работы машины.

По представленному графическому отображению влияния параметров на рисунке 6.21 возможно найти взаимосвязи на качественном уровне, для более углубленного исследования и выполнения аналитики требуется создать картограммы с возможностью отображения областей отклика (рисунок 6.22).

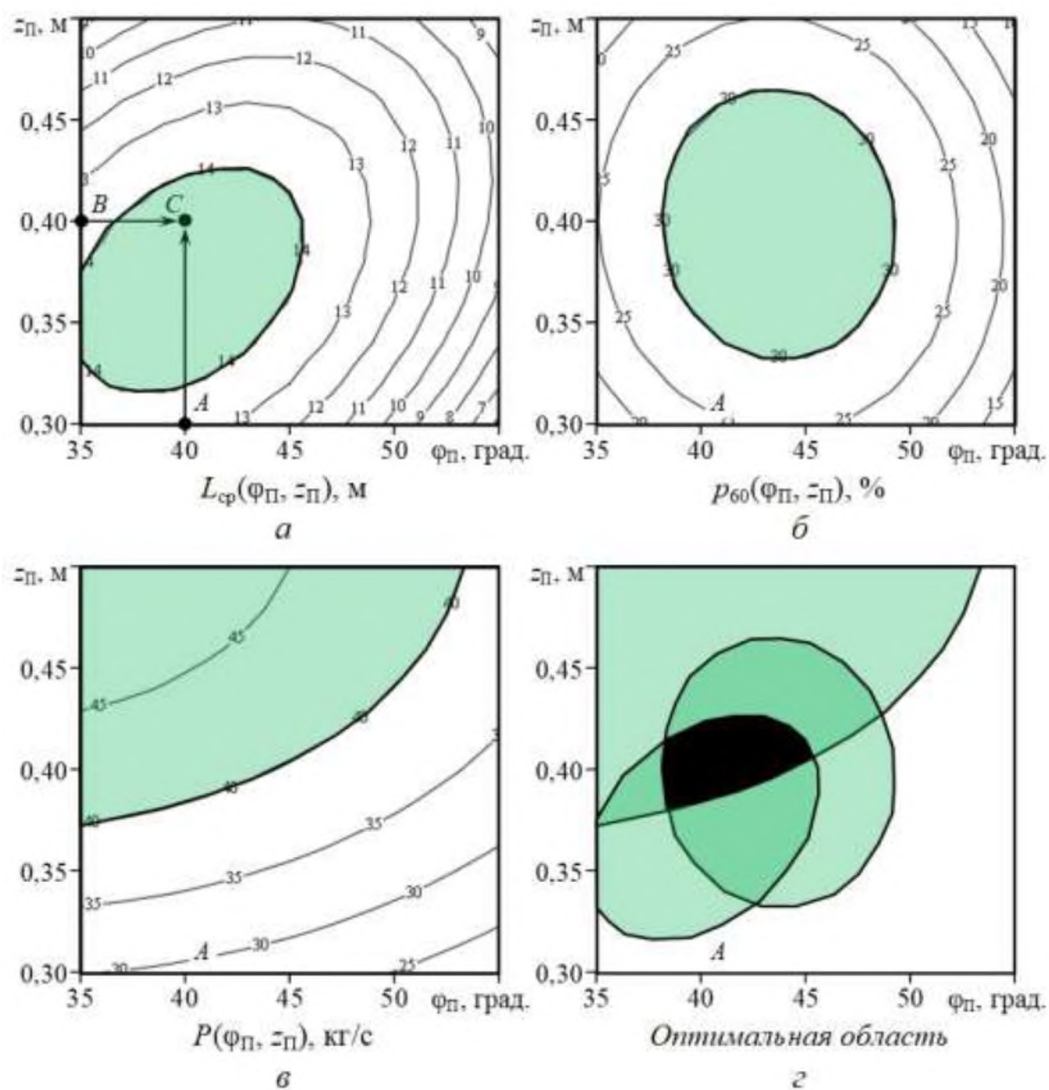


Рисунок 6.22 – Картограммы оптимизации параметров установки почвопровода грунтометательной машины (затемнены благоприятные области факторного пространства)

Модель применения картограмм отображена на рисунке 6.22, *а*. В том случае, если угол установки равен 40 градусов (точка *A*), а высота расположения почвопровода составляет 0,4 м (точка *B*), этом случае точка *C* совпадает с зоной характеристик 14 м и более. Показатель эффективности метания на дистанцию, на которую попадает поток грунта, составит 14,3 м и более.

На картограммах выделены при помощи цвета зоны положительных результатов с высокоэффективными характеристиками факторов.

Граничные показатели характеристик, отвечающих за разграничение на благоприятную и неблагоприятную области, отображены на картограмме рисунок 6.22, *а* $L_{cp} = 14$ м, $p_{60} = 30$ % МПа (рисунок 6.22, *б*) и $P = 40$ кг/с (рисунок 6.22, *в*), взяты на основании значения, что подходящая область станет использовать внушительную область факторного пространства, с высшими показателями условия и предела области, представляющего линию величины на картограмме.

Наложение положительных областей (рисунок 6.22, *г*) показывает оптимальную зону, на которую направляется поток грунта с оптимальными кучностью и производительность машины.

По отображению оптимального показателя в факторном пространстве (рисунок 6.22, *г*) возможно сделать вывод, что эффективный угол для установки почвопровода варьируется от 39 до 44 градусов, а оптимальная высота варьируется от 0,38 до 0,42 м. В данном случае средняя дистанция, на которую возможно направить поток грунта, будет не менее 14 м, но только 30 % грунта попадет в заданную полосу 60 см, а производительность будет не менее 40 кг/с.

Для поиска максимальной эффективности составлен план научных исследований. Оценка траектории перемещения потока грунта в воздушном пространстве позволяет сделать вывод о том, что объем в 30 % сфокусированы по практически идентичным траекториям, угол выброса составляет около 40...45 %, что обеспечивает наибольшую дальность метания грунта.

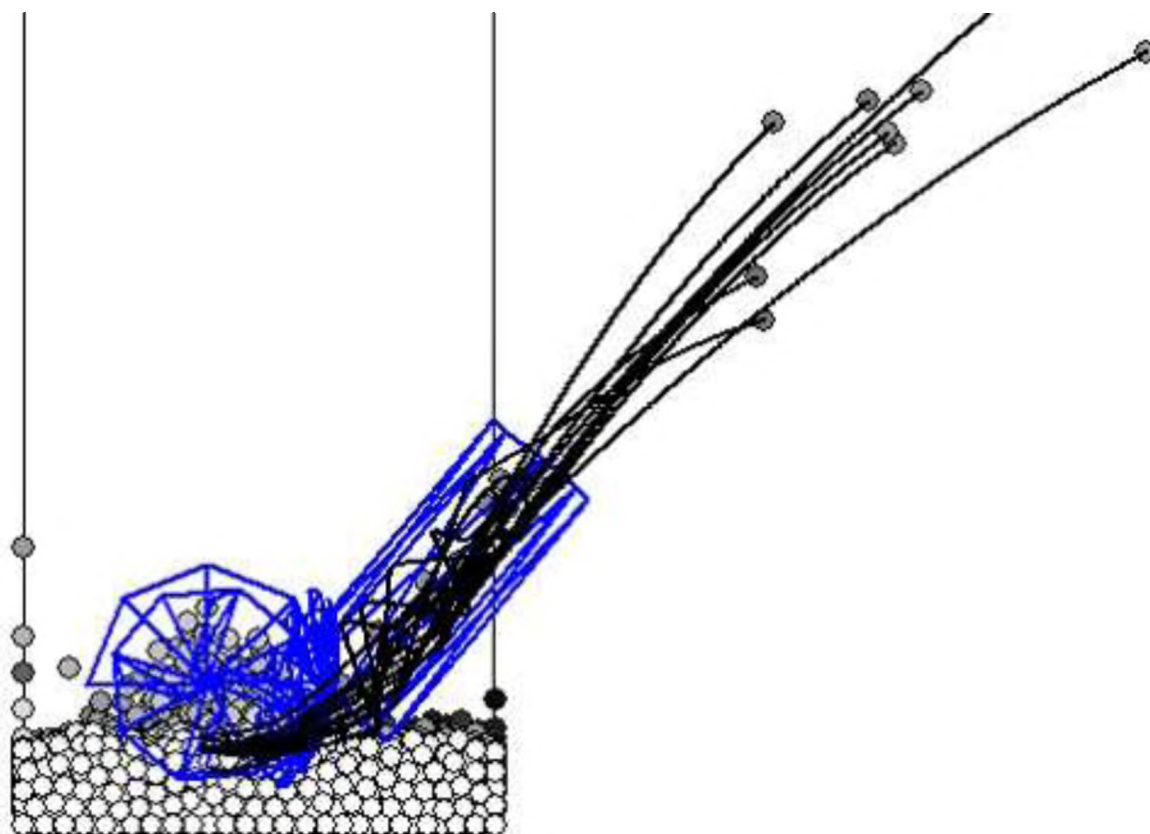


Рисунок 6.23 – Характер выброса грунта грунтометательной машиной с параметрами, близкими к оптимальным

6.9. Исследование эффективности грунтометательных машин на склонах

В процессе исследования и создания новых грунтометательных машин необходимо учитывать топографию рельефа местности, склоны и овраги – распространенное явление в лесном массиве. В рамках исследования проведено изучение работы машины на склонах до $20...25^\circ$. Проведенное исследование предоставило возможность оценки работоспособности и критериев качества работы на склонах, а также позволило получить искомые на основании поставленных задач зависимости.

Логичным и натуральным с точки зрения физики и математики методом определения значимости склона в период симуляции процесса является корректировка значения угла вектора ускорения свободного падения в поперечном (угол склона α) или продольном (угол склона β) направлениях.

Ненулевое значение поперечной или продольной величины ускорения свободного падения приводит к добавочной цели частиц передвигаться в поперечном или продольном направлениях. Это создает ограничение на пути, по которому проходит элемент грунта в процессе полета, также это отражается на геометрических характеристиках частицы, которая еще не вступила в контакт с рабочими органами.

6.10. Исследование влияния угла поперечного склона

Для исследования влияния параметров поперечного угла склона α на характеристики процесса работы базовой грунтометательной машины был выполнен цикл компьютерных опытов, в процессе которых меняли угол α от -30 до 30° с шагом 10° . Значения угла α со знаком «-» отображают процесс движения грунта вниз по склону (рисунок 6.24, а), но следует рассчитывать при этом на повышение дистанции метания (рисунок 6.24, в). Углы α со знаком «+» соответствуют процессу работы базовой грунтометательной машины вверх по склону, но следует учитывать, что это уменьшит дистанцию, на которую попадает порция грунта.

По показаниям кадров поперечных проекций XZ , возможно определить наличие боковой составляющей вектора ускорения свободного падения, что ведет к появлению небольшого уклона плоскости земли в модельном пространстве (рисунок 6.24, а, в), в итоге интенсифицирующего влияния на грунт всей машины.

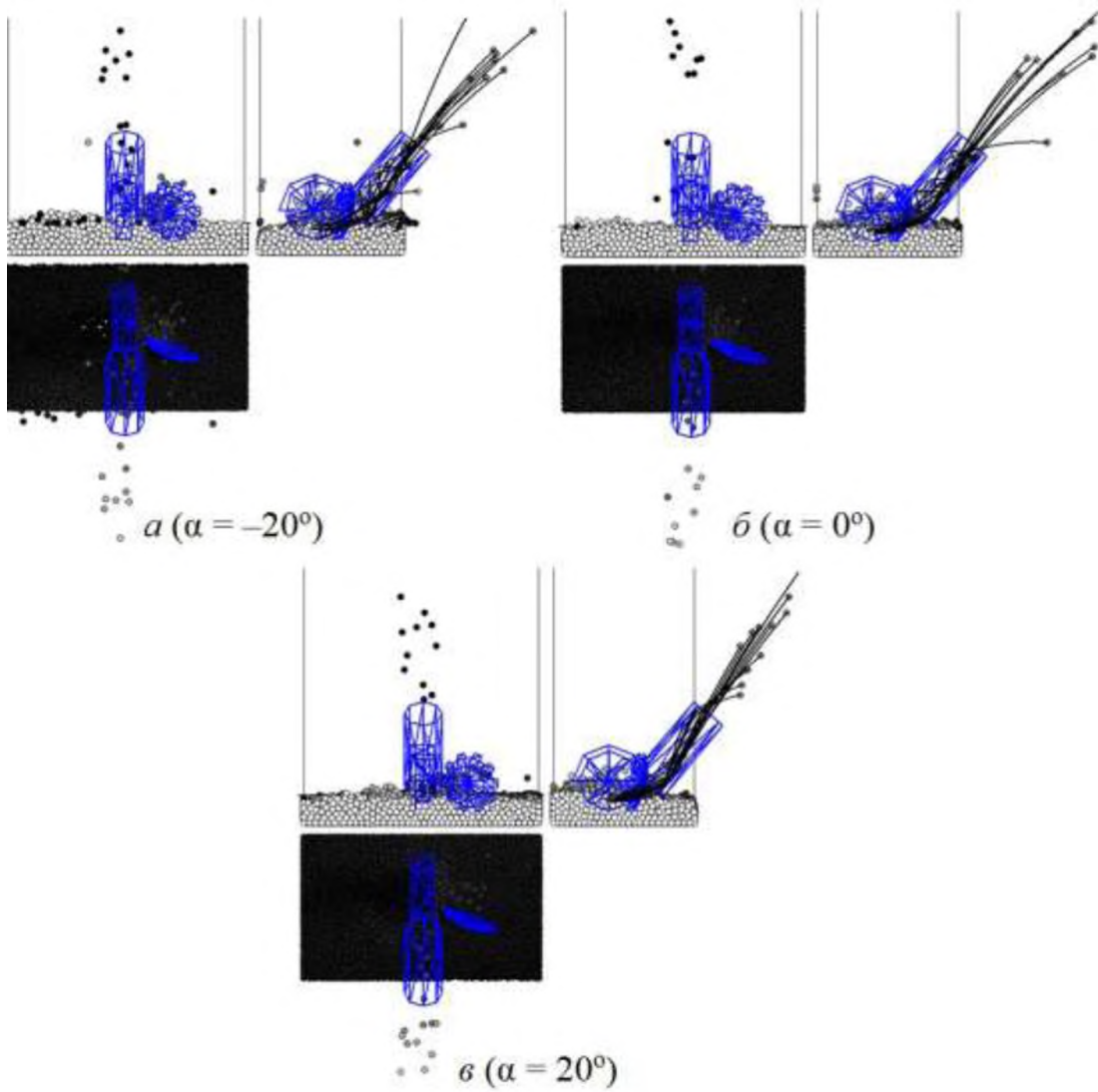


Рисунок 6.24 – Характер движения грунта в процессе работы грунтометательной машины в трех проекциях при различных углах α склона в поперечном направлении

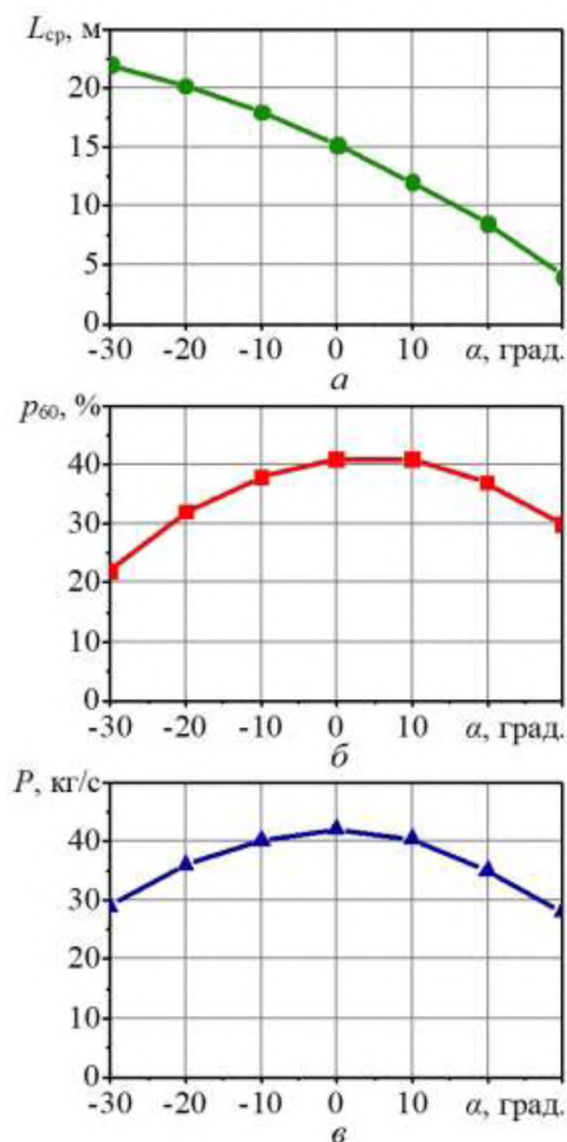


Рисунок 6.25 – Влияние угла α склона в поперечном направлении на среднюю дальность метания грунта L_{cp} , долю грунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность машины P

Выполненная серия опытов предоставила возможность определить зависимость, что с повышением значения угла склона α с -30° до $+30^\circ$ уменьшается расстояние, на которое возможно направить поток грунта с 23,8 м до 4,1 м (рисунок 6.25, а). Это характеризуется тем, что углы α со знаком «-» описывают процедуру проведения работ вниз по склону с траекторией по типу широкой параболы. Такой подход показывает, что полоса, покрытая

минерализованным грунтом, расположена в отдалении от линии движения базовой грунтометательной машины. В противоположном случае, когда метание производится вверх по склону, путь, который пролетают частицы, похож на узкую параболу и расстояние, на которое возможно направить поток, считается незначительным.

Данные кучности полета частиц грунта p_{60} доходят до максимального значения, когда происходит метание недалеко вверх по склону с углами $0 - 10^\circ$ (рисунок 6.25, б). Когда прирост показателя угла склона значительно повышается или снижается, уменьшается уровень кучности вследствие того, что характеристики, связанные с зацеплением грунтометательных лопаток с грунтом при передвижении машины, низкоэффективные.

Еще одной особенностью уменьшения кучности при отрицательных углах поверхности считается повышение дальности метания и увеличение ширины минерализованной полосы. В случае выполнения работ при показателях склона от -30 до $+30$ градусов производительность машины значительно снижается с 42 до 28...29 кг/с (рисунок 6.25, в). Это можно объяснить двумя причинами. Первая связана с присутствием боковой компоненты вектора ускорения свободного падения порций грунта, подвергнутого процессу обработки дисковыми рабочими органами и до грунтометательного механизма, который сдвигает в боковом направлении от центра вращения, вследствие чего уменьшает порцию грунта для метания. И вторая связана с различием теоретического и практического движения в воздухе внутри почвопровода (грунт больше прижимается к одной или другой стенке грунтопровода), в связи с этим уменьшается объем порций грунта, переведенный в полезный баллистический режим, и повышается объем грунта, попадающий назад.

Вследствие чего базовая грунтометательная машина может быть полезна при выполнении противопожарных работ, когда перемещение должно происходить под углом на поперечном склоне от -20 до $+15^\circ$. При этом дистанция полета составит от 10 до 24 м, а сфокусированность при падении в полосу шириной 0,6 м – от 32 до 42 %, при производительности – от 36 до 42 кг/с.

6.11. Исследование влияния угла продольного склона

По плану исследования получение данных сопровождается проведением имитационных исследований на персональном компьютере, для реализации задач исследования и поиска значения параметров угла продольного склона β на результат работы грунтометательной техники меняли показания угла β с -30 до 30° с шагом 10° . Графические результаты со значением угла β со знаком «-» представлены на рисунке 6.26, *а*, показывают, что базовая грунтометательная машина перемещалась вниз по склону, а при значении со знаком «+», наоборот, вверх по склону (рисунок 6.26, *в*).

Воспроизведение данных, показанных в продольных проекциях YZ , обозначает наличие продольной составляющей вектора ускорения свободного падения, что приводит к уклону насыпи грунта (рисунок 6.26, *а*, *в*) и увеличению давления на грунт конструкцией машины.

По итогу проведения серии опытов получены показания что, когда машина перемещается в одну из сторон склона, происходит равнозначное нарушение характеристик результативности грунтометательной техники.

Существенным обстоятельством, снижающим эффективность работы грунтометательной техники, является отклонение от угла продольного склона β от нулевой точки что, происходит к отступлению от оптимальных условий перемещения потока грунта по грунтопроводу. Отступление угла β в отрицательном или положительном значениях до 30° ведет к уменьшению дальности метания приблизительно на 3 м с расстоянием 15,2 м до 11-12 м (рисунок 6.26, *а*), а увеличение разлета частиц в заданной полосе 0,6 м с 41 % кучности до 36 %, и снижению показателя производительности с 42 до 38 кг/с.

В процессе научных исследований получены данные, которые позволили определить, что показатели эффективности грунтометательной машины менее подвержены к изменению в процессе передвижения вверх или вниз по склону, но в значительной степени изменяются в отрицательную сторону при изменении углов в поперечном направлении.

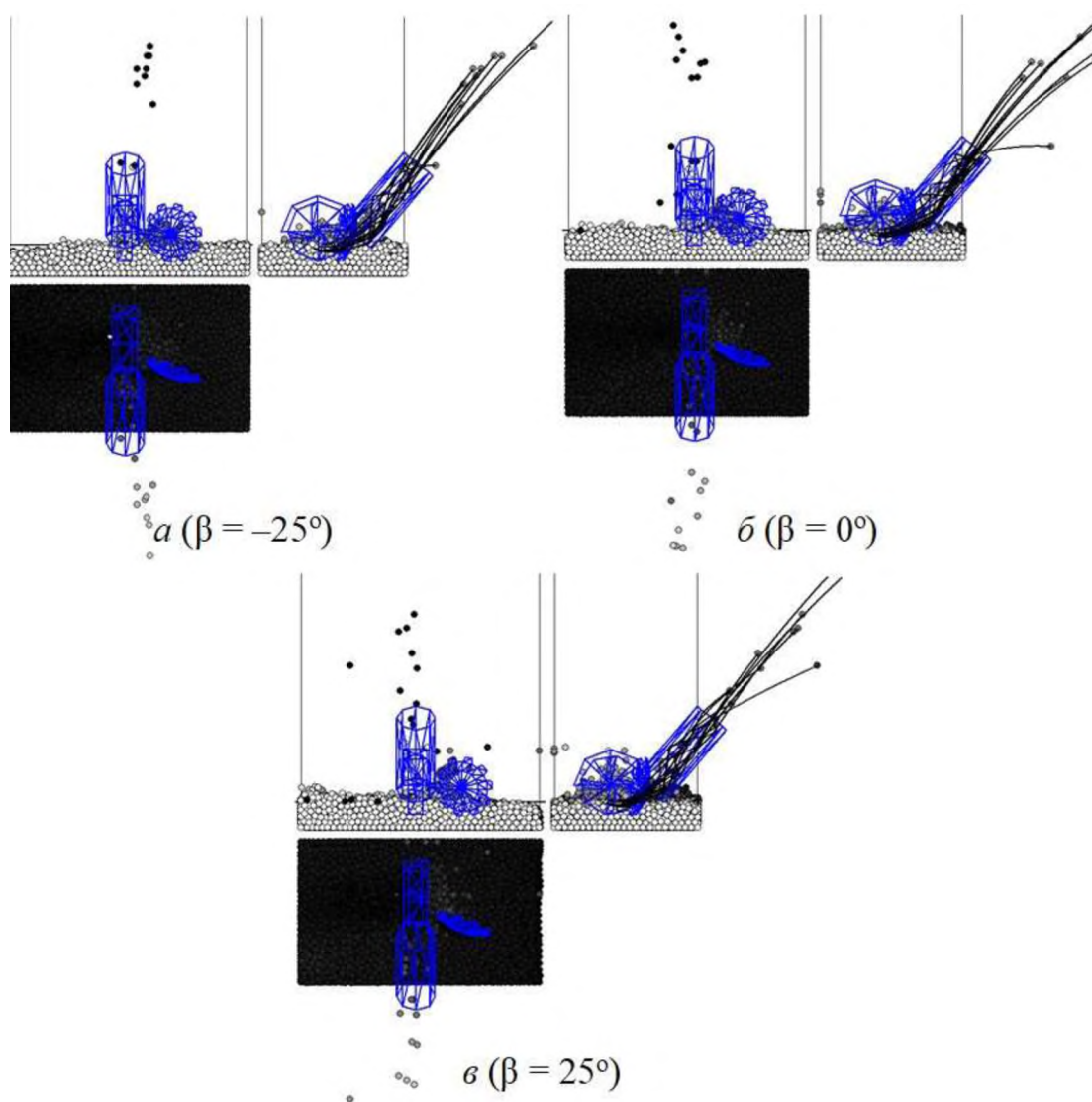


Рисунок 6.26 – Характер движения грунта в процессе работы грунтометательной машины в трех проекциях при различных углах β склона в продольном направлении

По полученным данным выявлено, что в связи с тем, что ухудшаются показатели эффективности работы машины, изменяются условия полета потока грунта внутри грунтопровода, рационально применять грунтопровод с модифицированными пространственными углами установки, задаваемыми оператором или алгоритмом обработки на основании показателей продольных или поперечных перемещений вектора ускорения свободного падения.

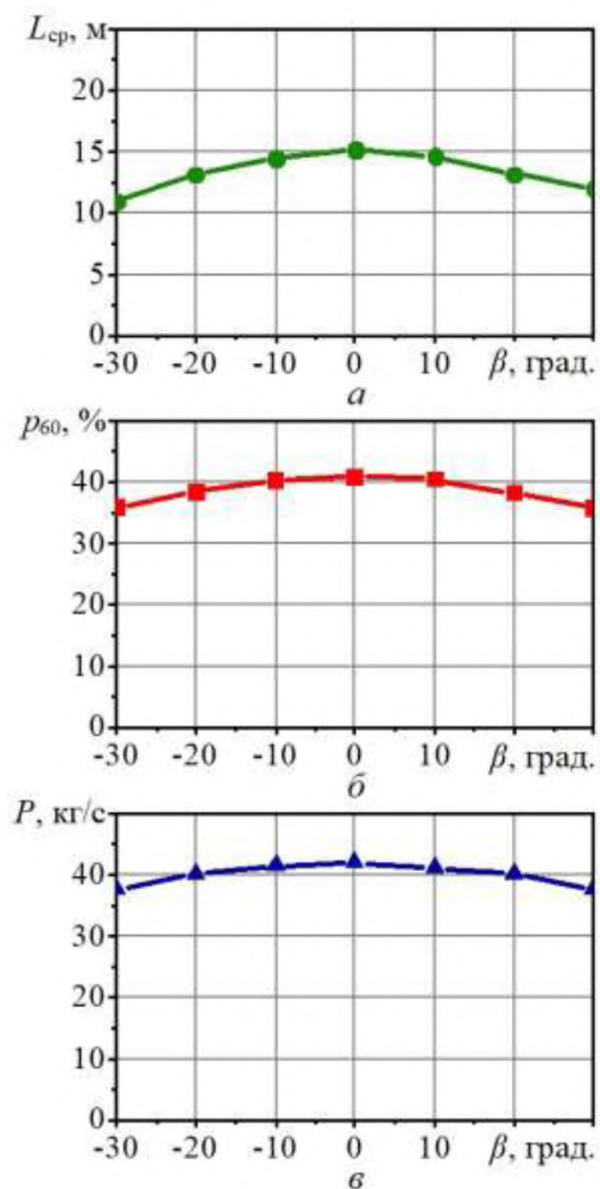


Рисунок 6.27 – Влияние угла β склона в продольном направлении на среднюю дальность метания грунта L_{cp} , доля грунта в полосе шириной 60 см p_{60} и производительность машины P

6.12. Выводы

1. Разработана математическая модель грунтометательной машины, воспроизводящая процесс работы с достаточно высокими характеристиками физической адекватности, детализацией и пространственным разрешением.

2. Разработана программа для проведения компьютерных экспериментов по метанию грунта машиной, позволяющая исследовать влияние конструктивных и технологических параметров, а также свойств грунта на показатели эффективности метания грунта.

3. Начальный этап компьютерных экспериментов показывает оптимальную эффективность работы грунтометательной техники в процессе противопожарных работ. Значение показателей дальности метания составляет около 15 м, поток грунта в объеме около 40 % попадает в полосу около 0,6 м от траектории движения МТА в агрегате с грунтометательной техникой с показателем производительности в районе 45 кг/с, и затрачиваемой мощностью около 9 кВт.

4. Длина почвопровода должна составлять 0,9 ... 1,2 м, что обеспечит среднюю дальность выброса 14 ... 15 м, объем потока грунта, попадающий в полосу 0,6 м, 38 ... 40 %, при производительности машины 38 ... 42 кг/с.

5. По полученным данным найден эффективный диаметр почвопровода, который равняется примерно 0,4 м, и дистанция, на которую при этом поток доставляется, равна около 15 м, с условием, что не менее 40 % потока грунта попадает в зону полосы 0,6 м и с показателем производительности в 42 кг/с.

6. Оптимальным является угол наклона почвопровода около 45° , который обеспечит наилучшие с точки зрения баллистики начальные условия полета частиц грунта, и захват высокоскоростной части потока грунта от грунтометательного механизма с малым угловым разбросом.

7. Оптимальная высота установки почвопровода составляет около 0,4 м. При этом в почвопровод попадает основная часть потока грунта, движущегося от грунтометательного механизма, имеющая высокую скорость и кучность. Благодаря отражению потока под малыми углами к внутренней поверхности почвопровода энергия частиц практически не теряется в почвопроводе и не происходит существенного перемешивания, снижающего кучность выброса.

8. Оптимальный угол установки почвопровода составляет 39 ... 44 градуса, оптимальная высота установки почвопровода составляет

0,38 ... 0,42 м. При этом средняя дальность метания грунта составит не менее 14 м, доля грунта, осаждаемого в целевой полосе шириной 60 см, составит не менее 30 %, производительность машины составит не менее 40 кг/с.

9. Грунтометательная техника показывает результативность при углах поперечного склона от -20 до 15° . Такие показатели рабочей поверхности позволяют достигать рабочей дистанции грунтометательной машиной от 10 до 24 м, и попадания в зону шириной 0,6 м от 32 до 42 %, объема потока грунта при производительности грунтометательной машины от 36 до 42 кг/с.

10. Смещение угла β до $\pm 30^\circ$ уменьшает рабочее расстояние для полета потока частиц грунта с 15,2 до 11...12 м, снижает плотность потока грунта за счет уменьшения кучности потока и полосы шириной 0,5 м с 41 до 36 %, и снижения производительности машины с 42 до 38 кг/с.

11. Исследуемая грунтометательная техника в большинстве случаев остается эффективной в процессе работы вверх или вниз по склону. Общая характеристика понижения эффективности грунтометательной машины составляет от 10 до 20 %, когда работы ведутся вверх или вниз по склону, но в поперечном направлении этот показатель составляет от 25 до 75 %.

12. Полученные данные свидетельствуют о том, что эффективность грунтометательной техники связана с траекторией движения и с траекторией перемещения потока внутри грунтопровода, оптимальным является грунтопровод с регулируемыми пространственными углами установки человеком или заранее составленным алгоритмом на основании изменения положения машины в пространстве и составляющих вектора ускорения свободного падения.

7. Определение оптимальных вариантов создания потока грунта и разработка рекомендаций для создания грунтометательных машин

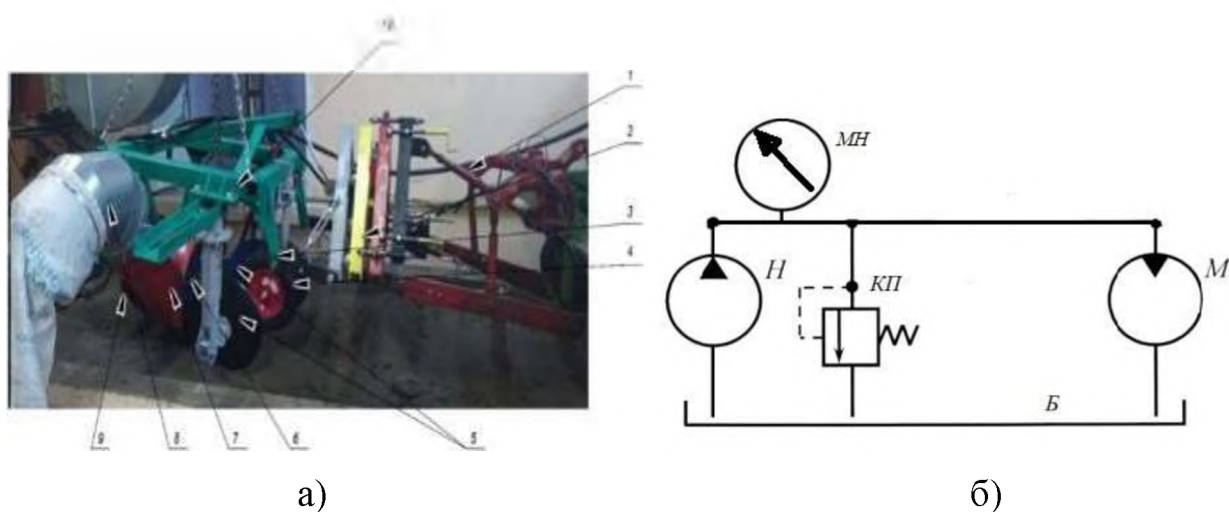
7.1. Исследование основных показателей работы грунтометательной машины с гидроприводом грунтометательного механизма

В данной главе описан процесс создания лабораторного образца машины, приведен план экспериментальных исследований грунтометательной машины, описаны полученные в процессе данные, выполнен анализ и сделаны выводы. Для создания грунтометательной машины требовалось провести как лабораторные эксперименты в почвенном канале кафедры МЛХиПМ, так и полевые исследования. Были выполнены предварительные исследования по конструктивным и технологическим особенностям грунтометательных машин. Определены основные узлы, которые представлены на рисунке 7.1, *а* и гидравлическая схема на рисунке 7.1, *б*. Проведение научных исследований по гидраприводу основополагалось на работы Попикова П.И. и Рыбака А.Т. [180, 181, 191, 192, 193].

Программа экспериментальных исследований состояла из составленной серии опытов с изменением не только регулировочных параметров, но и с внесением конструктивных корректировок, например, фрезерно-метательных. Рабочий орган обладал возможностью монтировать и убирать лопатки, тем самым изменяя общее их количество, в экспериментах участвовали 6, 4 и 3 лопатки, одновременно смонтированные на диск. Исследование метания потока грунта фрезой-метателем по технологическому процессу требовало выполнить весь перечень операций, в том числе в работе были и дисковые рабочие органы с диаметром 440 мм.

Запуск машины и приведение в исходное состояние перед серией опытов соответствовало следующей схеме: вначале подключали гидропривод, который приводил в действие фрезу-метатель лабораторной грунтометательной

машины. Обороты фрезы-метателя составляли 520 об/мин. Затем навеской энергетического средства машина опускалась до контакта с поверхностью земли. Поступательное перемещение по стенкам почвенного канала составляло 0,28 м/с, максимальный путь, на который могла перемещаться конструкция, составлял 10 м, время каждого эксперимента – от 36 до 38 секунд. Уровень заглубления фрезы-метателя варьировался на уровне до 15 см. По окончании каждого этапа эксперимента происходила остановка энергетического средства и отключение гидромотора, которым приводилась в действие фреза-метатель.



1 – навеска тележки почвенного канала; 2 – тензонавеска; 3 – навеска лабораторной установки; 4 – опорные колеса; 5 – дисковые рабочие органы; 6 – фреза-метатель; 7 – направляющий кожух; 8 – кожух-гаситель; 9 – гидромотор фрезы-метателя; 10 – рама; Н – насос; Б – резервуар для рабочей жидкости; М – гидромотор; КП – гидроклапан предохранительный; МН – манометр

Рисунок 7.1 – Лабораторная установка для исследования процесса метания грунта (а) и гидравлическая схема (б):

Для проведения расчетов и выполнения анализа использовалась тензометрическая система снятия динамических показателей давления от компании ZetLab. Контрольно-измерительная тензометрическая лаборатория ZET 058 (рисунок 7.2).



Рисунок 7.2 – Тензометрическая станция ZetLab

На рисунке 7.1 представлена гидравлическая схема. Лабораторная установка для исследования процесса метания грунта выполнена при помощи гидравлики. Устройство работы гидравлики представляет собой закрытую циклическую систему, где все начинается с насоса (Н), закачивающего гидравлическое масло из резервуара для рабочей жидкости (Б), приводя в действие гидромотор (М) который включает в работу фрезу-метатель б и заканчивается опять же на возвращении жидкости в резервуар для рабочей жидкости (Б). Масло весь цикл, попутно совершая действия и включая механические узлы в работу. В схему вмонтирован манометр (МН) и гидравлический датчик для измерения давления тензолабораторией.

Аппаратный комплекс состоит из программной составляющей, установленной на ПК ZETLAB TENZO, системы сбора данных ZET 058 и подключаемых датчиков (гидравлического давления, тензометрических и т.д.). Выполнение алгоритма действия происходит при помощи реорганизации снимаемых показаний с выводом в графическую и цифровую форму на монитор компьютера для дальнейшей обработки и анализа. Тензометрическая система ZET 058 позволяет питать датчики, зафиксированные в точках съема показаний как постоянным, так и переменным напряжением, это позволяет проводить съем и обработку показаний исследуемых характеристик при статических или динамических нагрузках.

Определение показаний давления в системе грунтометательной машины было выполнено датчиком ZET 315 (BC 315), показанным на рисунке 7.3. Максимальное динамическое давление, которые возможно измерить у ZET 315 (BC 315), не превышало 16 МПа.

План исследования предполагал снятие количественных характеристик объемов подаваемого грунта. Для выполнения этого условия кожух спроектирован с возможностью закрепления конструкции, которая в лабораторных условиях направляла весь объем грунта в резервуар объемом 1 м³.



Рисунок 7.3 – Датчик динамического давления ZET 315 (BC 315)

По полученным данным, для более плавного включения в работу необходимо постепенно заглублять фрезу-метатель в процессе поступательного движения на заданную глубину в грунт. Лабораторные условия ограничивали длину рабочей части энергетического средства с грунтометательной машиной. По данным, принимаемым для дальнейшего исследования, был взят промежуток с 7 по 35 секунду, что характеризовало установившийся режим работы. Анализ снимаемых показаний и последующая обработка позволяли выполнить расчет средних значений давления рабочей жидкости.

На этапе планирования экспериментальных исследований определены промежутки варьирования и уровни факторов. Показания граничных условий зафиксированы в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - 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

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 7.2.

Таблица 7.2 - Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Значение X	Давление Y_1 , МПа	Объем грунта на квадратный метр, m^3
1	-30		
2	-20		
3	-10		
4	0		
5	10		
6	20		
7	30		

При помощи программных приборов, входящих в комплект тензометрической установки, возможно графически наблюдать за процессом испытаний, например, на рисунках 7.3-7.6 изображены зафиксированные показания давления гидравлической жидкости в системе напорной магистрали в процессе проведения экспериментальных исследований грунтометательной машины.

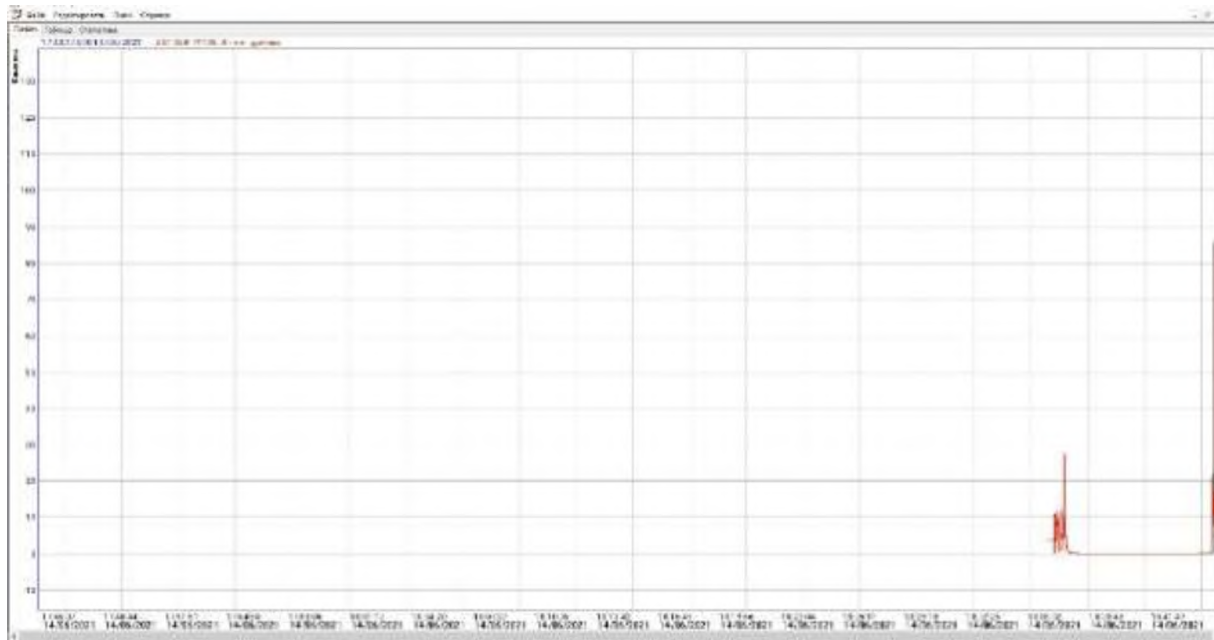


Рисунок 7.4 – Осциллограммы давления рабочей жидкости в напорной магистрали ($\gamma=-30^\circ$)

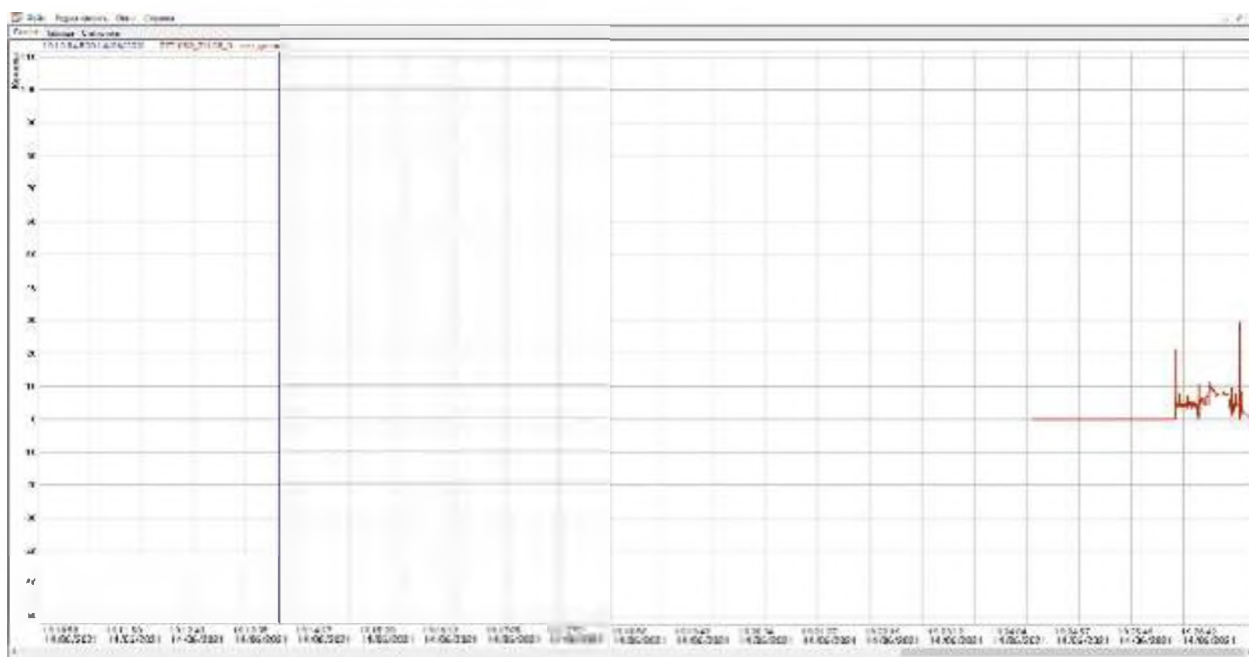


Рисунок 7.5 – Осциллограммы давления рабочей жидкости в напорной магистрали ($\gamma=0^\circ$)

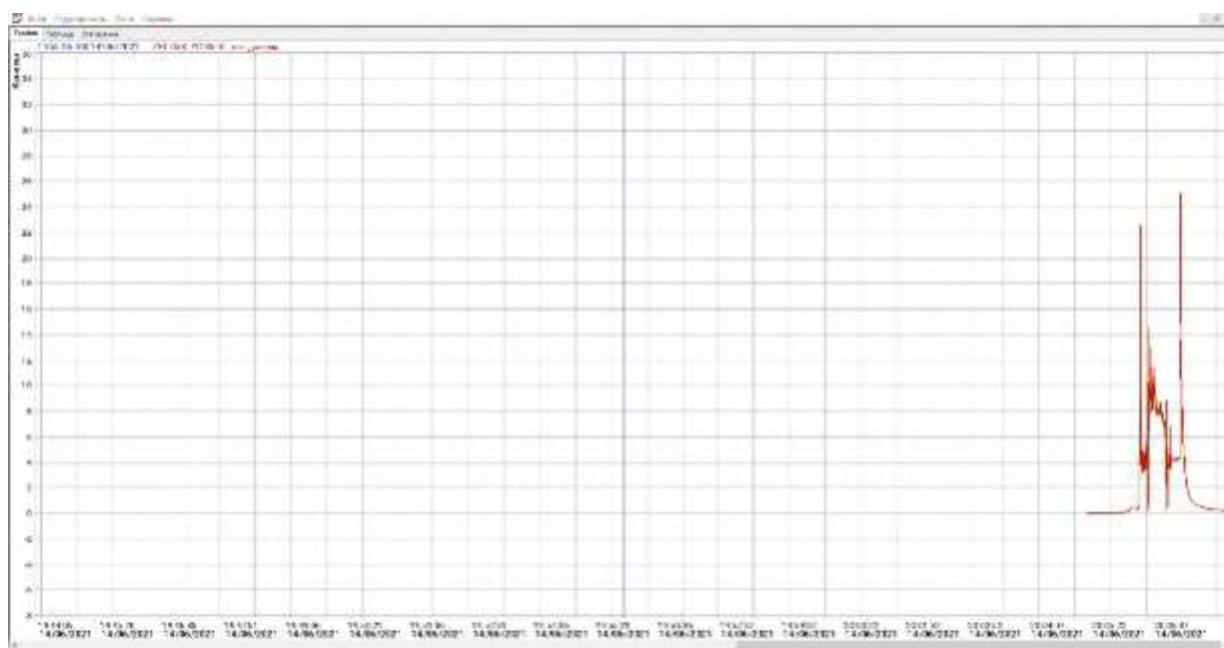


Рисунок 7.6 – Осциллограммы давления рабочей жидкости в напорной магистрали ($\gamma=30^\circ$)

В ходе выполнения плана научных исследований измерили показатели, наиболее влияющие на давление рабочей жидкости. Опыты провели при 10-кратном повторении, выполнен анализ зависимости угла установки лопаток

на фрезе-метателе γ на показатель гидравлического давления в системе. В качестве основных углов взяты значения от -30° до 30° с шагом интегрирования 10° . Схематично изменение углов установки лопаток показано на рисунке 7.7.

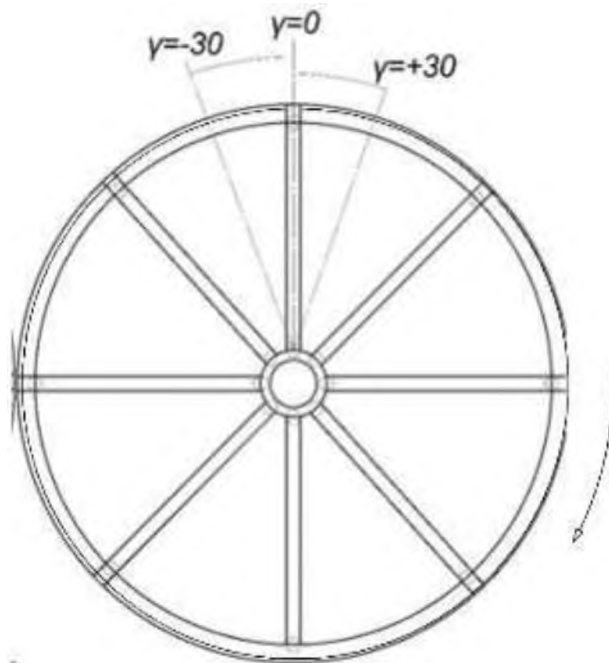


Рисунок 7.7 – Схема фрезы-метателя

Анализ полученных данных позволяет найти средние показатели характеристики давления рабочей жидкости и применять их в последующей статистической обработке.

Проведены опыты с определением эффективности метания потока грунта фрезой-метателем, оснащенной шестью лопатками с установкой углов согласно составленной матрице эксперимента. Далее были получены усреднённые результаты полученных экспериментальных данных.

Результаты экспериментальных замеров представлены в виде графиков на рисунке 7.8.

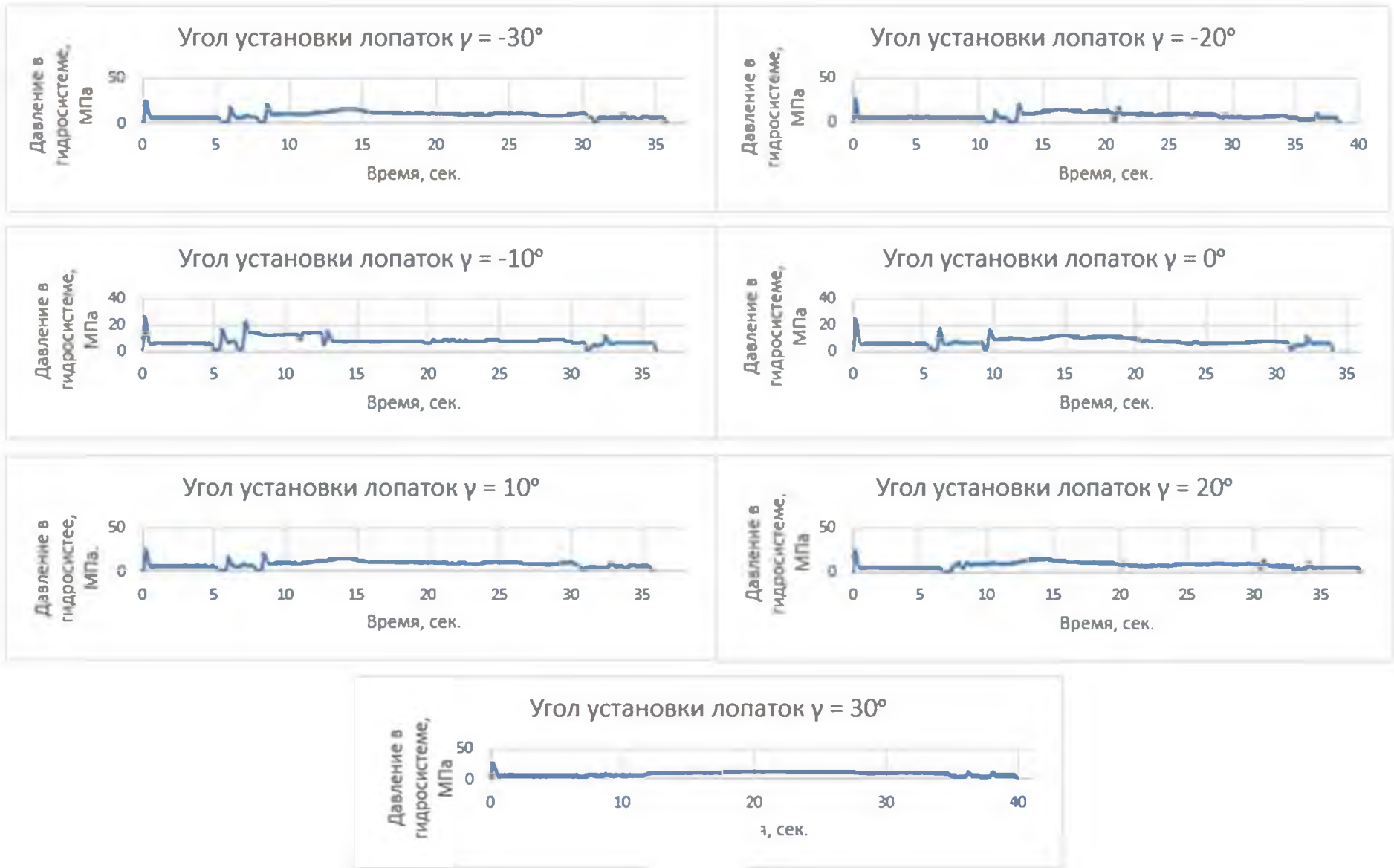


Рисунок 7.8 – Изменение давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя с шестью лопатками

При помощи функции «Описательная статистика» была выполнена статистическая обработка полученных данных в программе Microsoft Excel.

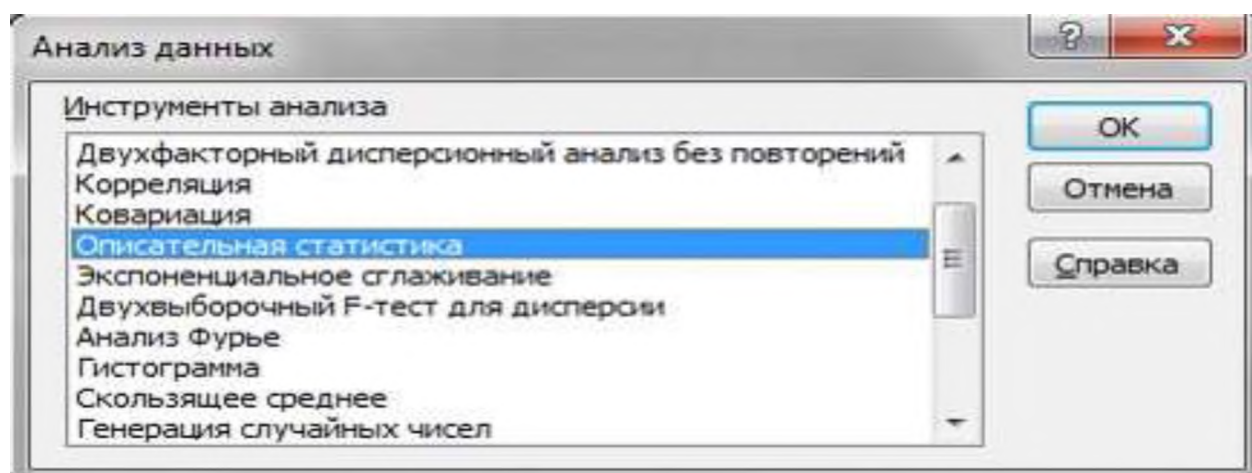


Рисунок 7.9 – Функция «Описательная статистика» из надстройки «Анализ данных»

Результаты анализа представлены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию грунта фрезой-метателем с шестью лопатками

№	Параметры распределения	Углы установки лопаток, град.						
		-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Среднее	9,27	8,44	7,97	7,63	8,59	9,22	9,53
2	Стандартная ошибка	0,16	0,19	0,16	0,14	0,13	0,15	0,11
3	Медиана	9,75	8,44	7,25	7,05	8,39	9,4	9,7
4	Стандартное отклонение	2,8	3,28	2,83	2,35	2,27	2,63	1,99
5	Дисперсия выборки	7,87	10,77	8,022	5,54	5,15	6,92	3,97

Окончание таблицы 7.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	Экссесс	1,92	0,54	3,18	0,53	0,73	1,06	-0,05
7	Асимметричность	-0,25	0,1	1,27	-0,03	-0,1	-0,42	-0,74
8	Интервал	19,4	19,83	20,75	14,816	13,07	14,73	9,15
9	Минимум	0,23	0,24	0,72	0,37	0,33	0,23	3,39
10	Максимум	19,63	20,07	21,48	15,18	13,41	14,96	12,54
11	Сумма	2605,9	2373,8	2241,1	2069,6	2285,1	2592,05	2678,1

В процессе выполнения анализа данных, полученных методом статистической обработки, возможно отследить ризоморфную связь двух переменных: давление гидравлической жидкости в системе грунтометательной машины и угол фиксации метающих лопаток. Такая информация позволяет записать аналитическое уравнение при помощи полиномиального соотношения в виде

$$Y=ax^2+bx+c. \quad (7.1)$$

Определение расчетных показателей давления гидравлической жидкости в системе выполнено с применением ризоморфных регрессий, с учетом описания множественного коэффициента корреляции, обозначающего уровень взаимосвязи в отношении факторного признака и зависимой переменной Y . Как правило, при наличии значительной доли влияния факторного признака на выходной критерий, коэффициент корреляции близок к единице.

Получаемые показания каждого опыта фиксировались отдельно и разделялись на показания давления гидравлической жидкости в системе грунтометательной машины и величины подаваемого грунта в расчете на один квадратный метр, показания занесены в таблицу 7.4.

Таблица 7.4 - Результаты экспериментов

Номер опыта	Значение X	Давление Y ₁ , МПа	Объем грунта на квадратный метр, м ³
1	2	3	4
1	-30	9,274	0,1
2	-20	8,447	0,1
3	-10	7,975	0,1
4	0	7,636	0,05
5	10	8,59	0,09
6	20	9,224	0,07
7	30	9,53	0,1

В процессе нахождения значений коэффициентов a , b и c регрессионного выражения взят за главный метод наименьших квадратов. Это первоначальный подход подбора коэффициентов выражения регрессии, потому что сумма квадратов отклонений исходных значений зависимой величины от вычисленных по выражению регрессии является наименьшей.

$$\begin{cases} \hat{a} \cdot \sum x^4 + \hat{b} \cdot \sum x^3 + \hat{c} \cdot \sum x^2 = \sum x^2 y \\ \hat{a} \cdot \sum x^3 + \hat{b} \cdot \sum x^2 + \hat{c} \cdot \sum x = \sum x \hat{y} \\ \hat{a} \cdot \sum x^2 + \hat{b} \cdot \sum x + \hat{c} \cdot n = \sum \hat{y} \end{cases} \quad (7.2)$$

Определение составленной системы математических выражений достижимо по методу Крамера, применяемого, когда число выражений равно значению неизвестных, а главный определитель матрицы отличен от нуля.

Использование метода Крамера выполним по заранее подготовленному алгоритму, занесенному в электронные таблицы Microsoft Excel.

В качестве первых шагов заполним таблицу для решения суммарных показаний при неизвестных в выражении (7.2) (таблица 7.5).

Таблица 7.5 - Исходные данные для реализации метода Крамера

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-30	9,274						
2	-20	8,447						
3	-10	7,975						
4	0	7,636						
5	10	8,59						
6	20	9,224						
7	30	9,53						
Сумм.								
Среднее								

Рассчитаем необходимые показатели с использованием математических функций программы Microsoft Excel (рисунок 7.10).

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²
1	-30	9,274	900	-27000	810000	-278,22	8346,6	86,00708
2	-20	8,447	400	-8000	160000	-168,94	3378,8	71,35181
3	-10	7,975	100	-1000	10000	-79,75	797,5	63,60063
4	0	7,636	0	0	0	0	0	58,3085
5	10	8,59	100	1000	10000	85,9	859	73,7881
6	20	9,224	400	8000	160000	184,48	3689,6	85,08218
7	30	9,53	900	27000	810000	285,9	8577	90,8209
Сумм.	0	60,676	2800	0	1960000	29,37	25648,5	528,9592
Среднее								

Рисунок 7.10 – Таблица с данными результатов расчёта необходимых показателей для реализации метода Крамера в программе Microsoft Excel

По данным теоретических расчетов, составим матрицу A , столбцы которой заполнены показаниями коэффициентов при неизвестных

коэффициентах в левых областях выражений системы (7.2)

$$A = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 2800 \\ 0 & 2800 & 0 \\ 2800 & 0 & 7 \end{vmatrix}.$$

По этой же схеме заполним три матрицы A_1 , A_2 , A_3 , составленные при изменении столбцов с таким же порядковым номером в первоначальной матрице на переменные правых частей выражения системы (7.1). По итогу получаем.

$$A_1 = \begin{vmatrix} 25648,5 & 0 & 2800 \\ 29,37 & 2800 & 0 \\ 60,676 & 0 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} 1966000 & 25648,5 & 2800 \\ 0 & 29,37 & 0 \\ 2800 & 60,676 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 25648,5 \\ 0 & 2800 & 29,37 \\ 2800 & 0 & 60,676 \end{vmatrix}.$$

Применение функции МОПРЕД в процессе исследования позволяет получить значения для каждой матрицы.

A=	1960000	0	2800	A2=	1960000	25648.5	2800	D=	16464000000
	0	2800	0		0	29.37	0	D1=	27010760
	2800	0	7		2800	60.676	7	D2=	172695600
								D3=	1.31906E+11
A1=	25648.5	0	2800	A3=	1960000	0	25648.5		
	29.37	2800	0		0	2800	29.37		
	60.676	0	7		2800	0	60.676		

Рисунок 7.11 – Результат расчета определителей для составленных матриц A , A_1 , A_2 , A_3

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$, $D_1 = 27010760$, $D_2 = 172695600$, $D_3 = 1.31906 \cdot 10^{11}$.

Коэффициенты для регрессионного уравнения (7.9) рассчитываются на основании выражения.

$$N = \frac{D_n}{D}, \quad (7.3)$$

где N – соответствующий коэффициент;

D_n – определитель матрицы A_n ;

D – определитель исходной матрицы A .

Вычисление коэффициентов регрессионного выражения a , b и c выполнено при добавлении требуемых формул в ячейки таблицы Microsoft Excel (рисунок 7.12).

	1960000	0	2800		1960000	25648.5	2800	D=	16464000000		
A=	0	2800	0	A2=	0	29.37	0	D1=	27010760	a=	0.001641
	2800	0	7		2800	60.676	7	D2=	172695600	b=	0.010489
								D3=	1.31906E+11	c=	8.011762
	25648.5	0	2800		1960000	0	25648.5				
A1=	29.37	2800	0	A3=	0	2800	29.37				
	60.676	0	7		2800	0	60.676				

Рисунок 7.12 – Результат расчёта коэффициентов регрессионного уравнения

$D = 16464000000$; $D_1=27010760$; $D_2= 172695600$; $D_3=1,32 \cdot 10^{11}$; $a=0,001641$; $b=0,010489$; $c=8,011762$.

Основываясь на полученных показаниях, находим искомое выражение регрессии

$$Y_I = 0,0016x^2 + 0,105x + 8,0118.$$

Вычислим показатель корреляции R между факторным признаком и зависимой переменной Y .

Данный параметр для нелинейных регрессионных моделей применяется для оценки значимости признаков в составленных моделях по критерию Фишера. Он вычисляется по формуле

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (7.4)$$

Внесем в таблицу 7.5 требуемый столбец с переменной Y^* . Поиск новой переменной производится по уравнению регрессии $Y = 0,0016x^2 + 0,105x + 8,0118$. Рассчитаем среднее значение Y посредством применения функции СРЗНАЧ для поиска квадрата разности между искомыми параметрами, добавляя показания в столбцы таблицы (таблица 7.6).

Таблица 7.6 - К расчёту индекса корреляции R

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Y _{ср}) ²
1	-30	9,27	900	27000	810000	-278,22	8346,6	86,007	9,17	0,01	0,36
2	-20	8,44	400	-8000	160000	-168,94	3378,8	71,35	8,45	0,0001	0,04
3	-10	7,97	100	-1000	10000	-79,75	797,5	63,6	8,07	0,009	0,48
4	0	7,63	0	0	0	0	0	58,3	8,01	0,14	1,06
5	10	8,59	100	1000	10000	85,9	859	73,78	8,28	0,09	0,006
6	20	9,22	400	8000	160000	184,48	3689,6	85,08	8,87	0,11	0,3
7	30	9,53	900	27000	810000	285,9	8577	90,82	9,8	0,07	0,74
Сумм.	0	60,67	2800	0	1960000	29,37	25648,5	528,95	60,67	0,45	3,01
Среднее	0	8,66									

Записав формулу (7.4) в требуемом для расчёта в Microsoft Excel виде, в итоге получаем, что переменная корреляции R равна 0,922 (рисунок 7.13). Посчитанная переменная близка к единице, это может означать тесную связь между величиной давления в гидросистеме привода фрезы-метателя и углом установки её лопаток.

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Y _{ср}) ²	
1	-30	9,274	900	-27000	810000	-278,22	8346,6	86,00708	9,173619	0,010076	0,367236	
2	-20	8,447	400	-8000	160000	-168,94	3378,8	71,35181	8,458214	0,000126	0,048841	
3	-10	7,975	100	-1000	10000	-79,75	797,5	63,60063	8,070929	0,009202	0,480249	
4	0	7,636	0	0	0	0	0	58,3085	8,011762	0,141197	1,065024	
5	10	8,59	100	1000	10000	85,9	859	73,7881	8,280714	0,095658	0,006084	
6	20	9,224	400	8000	160000	184,48	3689,6	85,08218	8,877786	0,119864	0,309136	
7	30	9,53	900	27000	810000	285,9	8577	90,8209	9,802976	0,074516	0,743044	
Сумм.	0	60,676	2800	0	1960000	29,37	25648,5	528,9592	60,676	0,450639	3,019614	
Среднее	0	8,668										
A=	1960000	0	2800			1960000	25648,5	2800		D=	16464000000	
	0	2800	0		A2=	0	29,37	0		D1=	27010760	
	2800	0	7			2800	60,676	7		D2=	172695600	
										D3=	1,31906E+11	
											c=	8,011762
a1=	25648,5	0	2800			1960000	0	25648,5		R=	0,922367924	
	29,37	2800	0		A3=	0	2800	29,37				
	60,676	0	7			2800	0	60,676				

Рисунок 7.13 – Результат расчёта индекса корреляции R

$D = 16464000000$; $D_1=27010760$; $D_2= 172695600$; $D_3=1,32 \cdot 10^{11}$; $a=0,001641$;
 $b=0,010489$; $c=8,011762$; $R=0,922$.

Расчёт индекса детерминации выполним путём возведения в квадрат индекса корреляции

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (7.5)$$

В результате вычислений индекс детерминации R^2 равняется 0,85 (рисунок 7.14). То есть в 85 % случаев изменение угла установки лопаток приводят к изменению зависимой переменной Y – давления в гидросистеме. Точность составления уравнения регрессии находится на высоком уровне. Остальные 15 % изменения отслеживаемого критерия объясняются факторами, не учтёнными в модели.

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Y _{ср}) ²		
1	-30	9.274	900	-27000	810000	-278.22	8346.6	86.00708	9.173619	0.010076	0.367236		
2	-20	8.447	400	-8000	160000	-168.94	3378.8	71.35181	8.458214	0.000126	0.048841		
3	-10	7.975	100	-1000	10000	-79.75	797.5	63.60063	8.070929	0.009202	0.480249		
4	0	7.636	0	0	0	0	0	58.3085	8.011762	0.141197	1.065024		
5	10	8.59	100	1000	10000	85.9	859	73.7881	8.280714	0.095658	0.006084		
6	20	9.224	400	8000	160000	184.48	3689.6	85.08218	8.877786	0.119864	0.309136		
7	30	9.53	900	27000	810000	285.9	8577	90.8209	9.802976	0.074516	0.743044		
Сумм.	0	60.676	2800	0	1960000	29.37	25648.5	528.9592	60.676	0.450639	3.019614		
Среднее	0	8.668											
	1960000	0	2800			1960000	25648.5	2800		D=	16464000000		
A=	0	2800	0		A2=	0	29.37	0		D1=	27010760	a=	0.001641
	2800	0	7			2800	60.676	7		D2=	172695600	b=	0.010489
										D3=	1.31906E+11	c=	8.011762
										R=	0.922367924		
										R2=	0.850762587		
A1=	25648.5	0	2800		A3=	1960000	0	25648.5					
	29.37	2800	0			0	2800	29.37					
	60.676	0	7			2800	0	60.676					

Рисунок 7.14 – Результат расчёта индекса детерминации R^2

$D = 16464000000$; $D_1=27010760$; $D_2= 172695600$; $D_3=1,32 \cdot 10^{11}$; $a=0,001641$;
 $b=0,010489$; $c=8,011762$; $R=0,922$; $R^2=0,85$.

Рассчитаем среднюю ошибку аппроксимации A для оценки качества регрессионного уравнения по относительным отклонениям каждого наблюдения. Она определяется по формуле

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - \hat{y}_x}{y} \right| \cdot 100\%. \quad (7.6)$$

Запишем данную формулу в соответствующей ячейке в требуемом для расчёта в Microsoft Excel виде и произведём вычисления для каждого значения Y (рисунок 7.15).

$D = 16464000000$; $D_1=27010760$; $D_2= 172695600$; $D_3=1,32 \cdot 10^{11}$; $a=0,001641$;
 $b=0,010489$; $c=8,011762$; $R=0,922$; $R^2=0,85$.

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Ycp) ²	ABS (A)
1	-30	9.274	900	-27000	810000	-278.22	8346.6	86.00708	9.173619	0.010076	0.367236	1.082391
2	-20	8.447	400	-8000	160000	-168.94	3378.8	71.35181	8.458214	0.000126	0.048841	0.132761
3	-10	7.975	100	-1000	10000	-79.75	797.5	63.60063	8.070929	0.009202	0.480249	1.202866
4	0	7.636	0	0	0	0	0	58.3085	8.011762	0.141197	1.065024	4.920926
5	10	8.59	100	1000	10000	85.9	859	73.7881	8.280714	0.095658	0.006084	3.600532
6	20	9.224	400	8000	160000	184.48	3689.6	85.08218	8.877786	0.119864	0.309136	3.753407
7	30	9.53	900	27000	810000	285.9	8577	90.8209	9.802976	0.074516	0.743044	2.864388
Сумм.	0	60.676	2800	0	1960000	29.37	25648.5	528.9592	60.676	0.450639	3.019614	
Среднее	0	8.668										2.508182
	1960000	0	2800			1960000	25648.5	2800	D=	16464000000		
A=	0	2800	0	A2=	0	29.37	0	D1=	27010760	a=	0.001641	
	2800	0	7		2800	60.676	7	D2=	172695600	b=	0.010489	
								D3=	1.31906E+11	c=	8.011762	
								R=	0.922367924			
	25648.5	0	2800		1960000	0	25648.5	R2=	0.850762587			
A1=	29.37	2800	0	A3=	0	2800	29.37					
	60.676	0	7		2800	0	60.676					

Рисунок 7.15 – Результат расчёта средней ошибки аппроксимации A

Расчёты показывают, что средняя ошибка аппроксимации равняется 2,5 %. Допустимым является значение, не превышающее 8-10 %.

Построенная по результатам анализа экспериментальных данных регрессионная зависимость влияния угла установки шести лопаток фрезы-метателя на величину давления её гидропривода в виде полинома второй степени приведена на рисунке 7.16.

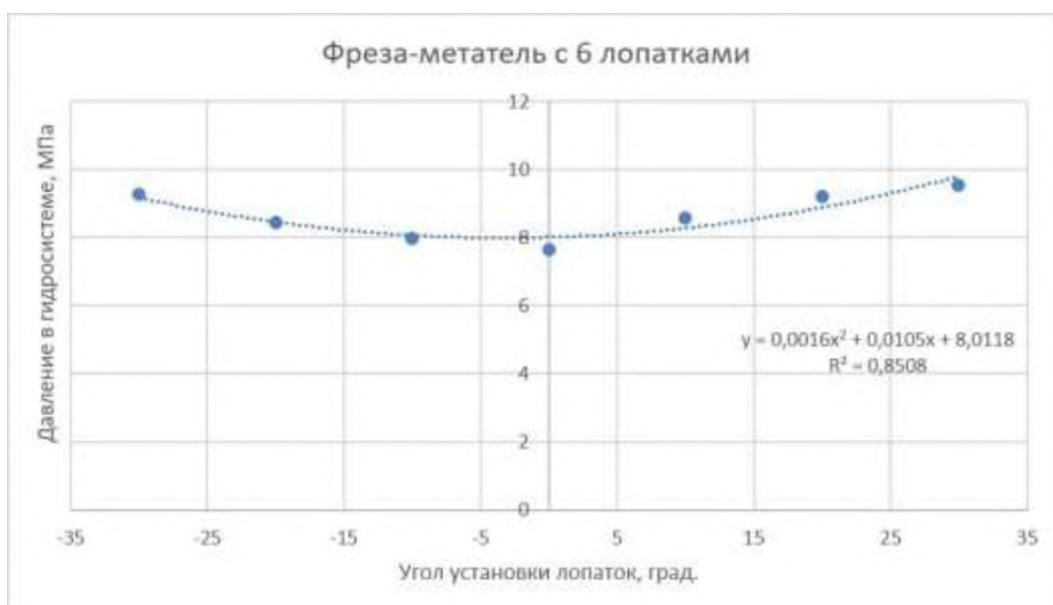


Рисунок 7.16 – Корреляционная зависимость угла установки лопаток (6 шт) фрезы-метателя и величины гидравлического давления

Далее выполнили серию опытов, в процессе которой измеряли объем грунта и величину давления гидравлической жидкости в системе при оснащении фрезы-метателя 4 лопатками с углами установки согласно плану эксперимента (таблице 7.7).

Таблица 7.7 - Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Значение X	Давление Y_1 , МПа	Объем почвы на квадратный метр, м ³
1	-30		
2	-20		
3	-10		
4	0		
5	10		
6	20		
7	30		

Далее были получены усреднённые результаты экспериментальных данных. Результаты экспериментальных замеров представлены в виде графиков на рисунке 7.17.

Нахождение показаний описательной статистики похожим образом было применено с применением функции «Описательная статистика» в программном комплексе Microsoft Excel. Результаты анализа представлены в таблице 7.8.

Таблица 7.8 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию грунта фрезой-метателем с четырьмя лопатками

№	Параметры распределения	Углы установки лопаток, град.						
		-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
1	Среднее	10,26	9,53	8,38	7,64	9,34	10,54	11,05
2	Стандартная ошибка	0,22	0,11	0,12	0,24	0,21	0,18	0,2
3	Медиана	11,43	9,7	8,51	6,72	9,18	10,8	11,96
4	Стандартное отклонение	3,8	1,99	2,08	3,88	3,67	3,022	3,37
5	Дисперсия выборки	14,48	3,97	4,36	15,06	13,54	9,13	11,41
6	Экссесс	-0,55	-0,05	0,55	7,18	0,014	-0,18	0,47
7	Асимметричность	-0,68	-0,74	-0,58	2,05	-0,28	-0,62	-1,08
8	Интервал	18,17	9,15	11,85	27,78	21,71	14,95	15,09
9	Минимум	0,24	3,39	0,26	0,18	0,25	0,53	0,22
10	Максимум	18,42	12,54	12,11	27,96	21,96	15,48	15,31
11	Сумма	2883,4	2678,1	2356,7	1896,06	2626,6	2962,5	2963,09

В процессе анализа данных статистики возможно отметить нелинейную зависимость показателей средней величины гидравлического давления в системе и углами крепления метателей на диске рабочем барабана. Равнозначно для определения аналитического уравнения зависимости величины давления от угла установки лопаток применим полиномиальную зависимость парной регрессии с функцией вида $Y=ax^2+bx+c$.

Процесс выполнения научных изысканий проведен с регистрацией данных и дальнейшей обработкой. В качестве основных фиксировались среднее гидравлическое давление и объем грунта при оснащении фрезы-метателя четырьмя лопатками, результаты экспериментов представлены в таблице 7.9.

Таблица 7.9 - Результаты экспериментов

Номер опыта	Значение X	Давление Y_2 , МПа	Объем грунта на квадратный метр, м ³
1	-30	10,26	0,1
2	-20	9,53	0,095
3	-10	8,38	0,09
4	0	7,65	0,05
5	10	9,34	0,07
6	20	10,54	0,05
7	30	11,05	0,1

Аналогично методике обработки экспериментальных данных замера давления в гидросистеме привода фрезы-метателя с шестью лопатками, для определения коэффициентов a , b и c регрессионного выражения применен метод наименьших квадратов, при помощи которого решена система алгебраических выражений вида (7.7).

Решение данной системы алгебраических уравнений выполним на основе метода Крамера, используемого в случае, когда число уравнений системы равно числу неизвестных, а главный определитель матрицы отличен от нуля.

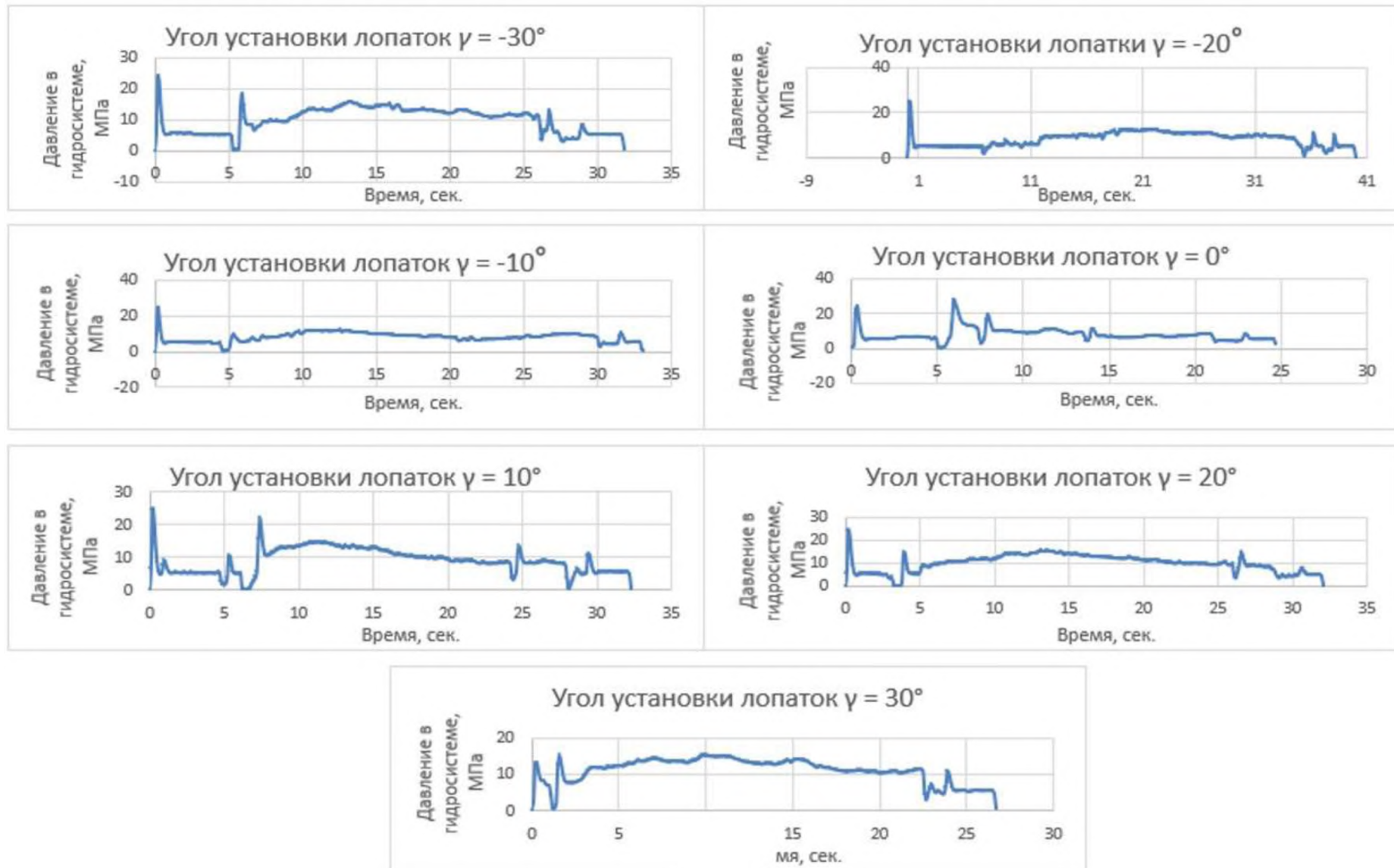


Рисунок 7.17 – Изменение давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя с четырьмя лопатками

Применение метода Крамера осуществим на основе алгоритма, реализованного в программе Microsoft Excel. Первоначально составим таблицу для подсчёта сумм при неизвестных в уравнении (7.7) (таблица 7.10).

Таблица 7.10 - Исходные данные для реализации метода Крамера

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y
1	-30	10,261					
2	-20	9,531					
3	-10	8,387					
4	0	7,65					
5	10	9,347					
6	20	10,543					
7	30	11,056					
Сумм.							
Среднее							

Выполним расчет требуемых показателей при помощи математических выражений в Microsoft Excel (рисунок 7.18).

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²
1	-30	10.261	900	-27000	810000	-307.83	9234.9	105.2881
2	-20	9.531	400	-8000	160000	-190.62	3812.4	90.83996
3	-10	8.387	100	-1000	10000	-83.87	838.7	70.34177
4	0	7.65	0	0	0	0	0	58.44603
5	10	9.347	100	1000	10000	93.47	934.7	87.36641
6	20	10.543	400	8000	160000	210.86	4217.2	111.1548
7	30	11.056	900	27000	810000	331.68	9950.4	122.2351
Сумм.	0	66.77	2800	0	1960000	53.69	28988.3	645.6723
Среднее								

Рисунок 7.18 – Результаты расчета необходимых показателей для реализации метода Крамера в программе Microsoft Excel

На основе рассчитанных показателей сформируем матрицу A , столбцы которой состоят из коэффициентов при неизвестных коэффициентах в левых частях уравнений системы (7.8)

$$A = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 2800 \\ 0 & 2800 & 0 \\ 2800 & 0 & 7 \end{vmatrix}.$$

По аналогии составим три матрицы A_1 , A_2 , A_3 , получаемые заменой столбцов с тем же порядковым номером в исходной матрице на элементы правых частей уравнений системы (7.9). В результате получаем

$$A_1 = \begin{vmatrix} 28988,3 & 0 & 2800 \\ 53,69 & 2800 & 0 \\ 66,77 & 0 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} 1966000 & 28988,3 & 2800 \\ 0 & 53,69 & 0 \\ 2800 & 66,77 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 28988,3 \\ 0 & 2800 & 53,69 \\ 2800 & 0 & 66,77 \end{vmatrix}.$$

С использованием функции МОПРЕД программы Microsoft Excel вычислим определители для каждой из четырех составленных матриц. Результат расчета определителей для составленных матриц A , A_1 , A_2 , A_3 (рисунок 7.19).

	1960000	0	2800			1960000	28988.3	2800	D=	16464000000
A=	0	2800	0	A2=	0	53.69	0	D1=	44693880	
	2800	0	7		2800	66.77	7	D2=	315697200	
								D3=	1.39165E+11	
	28988.3	0	2800			1960000	0	28988.3		
A1=	53.69	2800	0	A3=	0	2800	53.69			
	66.77	0	7		2800	0	66.77			

Рисунок 7.19 – Результат расчета определителей для составленных матриц A , A_1 , A_2 , A_3

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$, $D_1 = 44693880$, $D_2 = 315697200$, $D_3 = 1.39165 \cdot 10^{11}$.

Расчёт коэффициентов a , b и c уравнения регрессии был произведён путём введения соответствующих формул в ячейки рабочего листа программы Microsoft Excel (рисунок 7.20).

A=	1960000	0	2800	A2=	1960000	28988.3	2800	D=	16464000000	
	0	2800	0		0	53.69	0	D1=	44693880	a= 0.002715
	2800	0	7		2800	66.77	7	D2=	315697200	b= 0.019175
								D3=	1.39165E+11	c= 8.452714
A1=	28988.3	0	2800	A3=	1960000	0	28988.3			
	53.69	2800	0		0	2800	53.69			
	66.77	0	7		2800	0	66.77			

Рисунок 7.20 – Результат расчёта коэффициентов регрессионного уравнения

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$, $D_1 = 44693880$, $D_2 = 315697200$, $D_3 = 1.39165 \cdot 10^{11}$; $a=0,002715$; $b=0,019175$; $c=8,452714$.

С учётом выполненных расчётов получаем требуемое уравнение регрессии

$$Y_2 = 0,0027x^2 + 0,0192x + 8,4527.$$

Рассчитаем индекс корреляции R между факторным признаком и зависимой переменной Y .

Добавим в таблица 7.10 необходимый столбец со значением Y^* , которое рассчитывается по выражению уравнения регрессии $Y = 0,0027x^2 + 0,0192x + 8,4527$. Посчитаем среднее значение Y путём использования функции СРЗНАЧ и найдём квадрат разности между требуемыми параметрами, также внеся их в таблицу для удобства расчётов в Microsoft Excel (таблица 7.11).

Таблица 7.11 - К расчёту индекса корреляции R

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Y _{ср}) ²
1	30	10,26	900	-27000	810000	-307,83	9234,9	105,28	10,32	0,0035	0,52
2	20	9,53	400	-8000	160000	-190,62	3812,4	90,83	9,15	0,14	5,73*10 ^{-0,5}
3	10	8,38	100	-1000	10000	-83,87	838,7	70,34	8,53	0,02	1,32
4	0	7,65	0	0	0	0	0	58,44	8,45	0,65	3,58
5	10	9,34	100	1000	10000	93,47	934,7	87,36	8,91	0,18	0,036
6	20	10,54	400	8000	160000	210,86	4217,2	111,15	9,92	0,38	1,008
7	30	11,056	900	27000	810000	331,68	9950,4	122,23	11,47	0,17	2,3
Сумм.	0	66,77	2800	0	1960000	53,69	28988,3	645,67	66,77	1,56	8,78
Среднее	0	9,53									

Записав формулу (7.12) в требуемом для расчёта в Microsoft Excel виде, в итоге получаем, что значение индекса корреляции $R = 0,906$ (рисунок 7.21). Полученное значение, близкое к единице, говорит о тесной связи между величиной давления в гидросистеме привода фрезы-метателя и углом установки её четырёх лопаток.

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Y _{ср}) ²	
1	-30	10.261	900	-27000	810000	-307.83	9234.9	105.2881	10.32064	0.003557	0.521903041	
2	-20	9.531	400	-8000	160000	-190.62	3812.4	90.83996	9.155071	0.141322	5.73265E-05	
3	-10	8.387	100	-1000	10000	-83.87	838.7	70.34177	8.532429	0.021149	1.326116755	
4	0	7.65	0	0	0	0	0	58.44603	8.452714	0.652402	3.585612755	
5	10	9.347	100	1000	10000	93.47	934.7	87.36641	8.915929	0.185823	0.036699612	
6	20	10.543	400	8000	160000	210.86	4217.2	111.1548	9.922071	0.385552	1.008876755	
7	30	11.056	900	27000	810000	331.68	9950.4	122.2351	11.47114	0.172344	2.302589469	
Сумм.	0	66.77	2800	0	1960000	53.69	28988.3	645.6723	66.77	1.56215	8.781855714	
Среднее	0	9.538571										
A=	1960000	0	2800			1960000	28988.3	2800		D=	16464000000	
	0	2800	0		A2=	0	53.69	0		D1=	44693880	
	2800	0	7			2800	66.77	7		D2=	315697200	
										D3=	1.39165E+11	
											c=	8.452714
										R=	0.906706237	
A1=	28988.3	0	2800			1960000	0	28988.3				
	53.69	2800	0		A3=	0	2800	53.69				
	66.77	0	7			2800	0	66.77				

Рисунок 7.21 – Результат расчёта индекса корреляции R

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$, $D_1 = 44693880$, $D_2 = 315697200$, $D_3 = 1.39165 \cdot 10^{11}$; $a=0,002715$; $b=0,019175$; $c=8,452714$; $R=0,9067$.

В результате вычислений индекс детерминации R^2 равняется 0,82 (рисунок 7.22). То есть в 82 % случаев изменения угла установки четырёх

лопаток приводят к изменению зависимой переменной Y – давления в гидросистеме. Точность составления уравнения регрессии находится на высоком уровне. Остальные 18 % изменения отслеживаемого критерия объясняются факторами, не учтёнными в модели.

№	X	Y	X2	X3	X4	X*Y	X2*Y	Y2	Y*	(Y-Y*)^2	(Y-Ycp)^2
1	-30	10.261	900	-27000	810000	-307.83	9234.9	105.2881	10.32064	0.003557	0.521903041
2	-20	9.531	400	-8000	160000	-190.62	3812.4	90.83996	9.155071	0.141322	5.73265E-05
3	-10	8.387	100	-1000	10000	-83.87	838.7	70.34177	8.532429	0.021149	1.326116755
4	0	7.65	0	0	0	0	0	58.44603	8.452714	0.652402	3.585612755
5	10	9.347	100	1000	10000	93.47	934.7	87.36641	8.915929	0.185823	0.036699612
6	20	10.543	400	8000	160000	210.86	4217.2	111.1548	9.922071	0.385552	1.008876755
7	30	11.056	900	27000	810000	331.68	9950.4	122.2351	11.47114	0.172344	2.302589469
Сумм.	0	66.77	2800	0	1960000	53.69	28988.3	645.6723	66.77	1.56215	8.781855714
Среднее	0	9.538571									
A=	1960000	0	2800			1960000	28988.3	2800	D=	16464000000	
	0	2800	0	A2=		0	53.69	0	D1=	44693880	a= 0.002715
	2800	0	7			2800	66.77	7	D2=	315697200	b= 0.019175
									D3=	1.39165E+11	c= 8.452714
									R=	0.906706237	
A1=	28988.3	0	2800			1960000	0	28988.3	R2=	0.822116201	
	53.69	2800	0	A3=		0	2800	53.69			
	66.77	0	7			2800	0	66.77			

Рисунок 7.22 – Результат расчёта индекса детерминации R^2

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$, $D_1 = 44693880$, $D_2 = 315697200$, $D_3 = 1.39165 \cdot 10^{11}$; $a=0,002715$; $b=0,019175$; $c=8,452714$; $R=0,9067$; $R^2=0,8222$.

По формуле (7.14) рассчитаем среднюю ошибку аппроксимации A для оценки качества регрессионного уравнения по относительным отклонениям каждого наблюдения.

Запишем данную формулу в соответствующей ячейке в требуемом для расчёта в Microsoft Excel виде и произведём вычисления для каждого значения Y (рисунок 7.23).

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$, $D_1 = 44693880$, $D_2 = 315697200$, $D_3 = 1.39165 \cdot 10^{11}$; $a=0,002715$; $b=0,019175$; $c=8,452714$; $R=0,9067$; $R^2=0,8222$.

Расчёты показывают, что средняя ошибка аппроксимации равняется 4,44 %. Допустимым является значение, не превышающее 8-10 %.

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Ycp) ²	ABS
1	-30	10.261	900	-27000	810000	-307.83	9234.9	105.2881	10.32064	0.003557	0.521903041	0.581258
2	-20	9.531	400	-8000	160000	-190.62	3812.4	90.83996	9.155071	0.141322	5.73265E-05	3.944272
3	-10	8.387	100	-1000	10000	-83.87	838.7	70.34177	8.532429	0.021149	1.326116755	1.733976
4	0	7.65	0	0	0	0	0	58.44603	8.452714	0.652402	3.585612755	10.56526
5	10	9.347	100	1000	10000	93.47	934.7	87.36641	8.915929	0.185823	0.036699612	4.611869
6	20	10.543	400	8000	160000	210.86	4217.2	111.1548	9.922071	0.385552	1.008876755	5.889487
7	30	11.056	900	27000	810000	331.68	9950.4	122.2351	11.47114	0.172344	2.302589469	3.75491
Сумм.	0	66.77	2800	0	1960000	53.69	28988.3	645.6723	66.77	1.56215	8.781855714	
Среднее	0	9.538571										4.440148

A=	1960000	0	2800	A2=	1960000	28988.3	2800	D=	16464000000			
	0	2800	0		0	53.69	0	D1=	44693880	a=	0.002715	
	2800	0	7		2800	66.77	7	D2=	315697200	b=	0.019175	
								D3=	1.39165E+11	c=	8.452714	
								R=	0.906706237			
A1=	28988.3	0	2800	A3=	1960000	0	28988.3	R2=	0.822116201			
	53.69	2800	0		0	2800	53.69					
	66.77	0	7		2800	0	66.77					

Рисунок 7.23 – Результат расчёта средней ошибки аппроксимации A

Построенная по результатам анализа экспериментальных данных регрессионная зависимость влияния угла установки четырёх лопаток фрезы-метателя на величину давления её гидропривода в виде полинома второй степени приведена на рисунке 7.24.

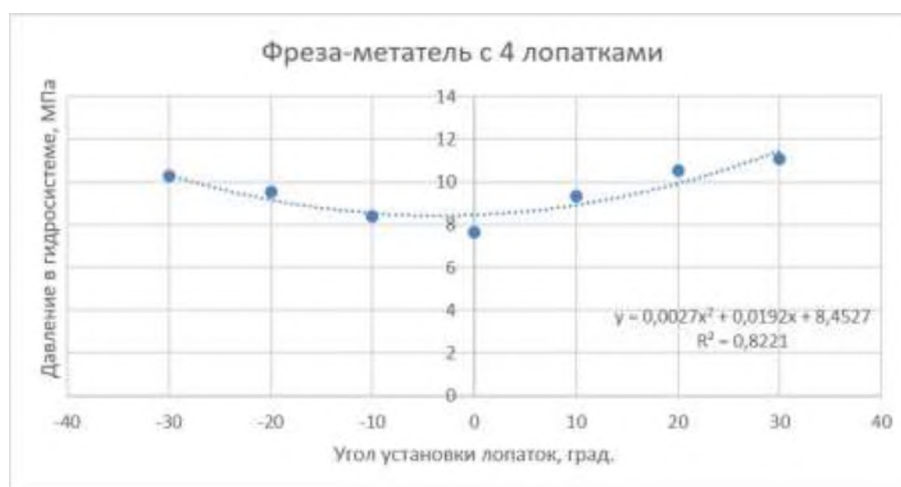


Рисунок 7.24 – Зависимость влияния угла установки четырёх лопаток фрезы-метателя на величину давления её гидропривода

В завершение была проведена серия экспериментов по замеру давления рабочей жидкости в гидросистеме привода фрезы-метателя, оснащённой тремя лопатками, и объёма метаемого грунта. Угол их установки на диске согласно матрице планирования эксперимента (таблица 7.12) был аналогичен предыдущим экспериментам.

Таблица 7.12 - Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Значение X	Давление Y _з , МПа	Объем почвы на квадратный метр, м ³
1	-30		
2	-20		
3	-10		
4	0		
5	10		
6	20		
7	30		

Результаты экспериментальных замеров представлены в виде графиков на рисунке 7.25.

Определение данных описательной статистики аналогичным предыдущим сериям экспериментов образом было реализовано с использованием функции «Описательная статистика» в программе Microsoft Excel. Результаты анализа представлены в таблица 7.13.

Таблица 7.13 - Данные описательной статистики, рассчитанные в программе Microsoft Excel, для экспериментов по метанию грунта фрезой-метателем с тремя лопатками

№	Параметры распределения	Углы установки лопаток, град.						
		-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Среднее	9,22	7,97	7,63	6,45	7,63	9,53	10,23
2	Стандартная ошибка	0,15	0,16	0,14	0,43	0,14	0,11	0,19
3	Медиана	9,4	7,25	7,03	3,48	7,03	9,7	11,32
Окончание таблицы 7.13								

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	Стандартное отклонение	2,63	2,83	2,48	7,21	2,48	1,99	3,18
5	Дисперсия выборки	6,92	8,022	6,17	52,06	6,15	3,97	10,16
6	Эксцесс	1,069	3,18	0,96	2,51	0,93	-0,05	0,36
7	Асимметричность	-0,42	1,27	0,16	1,86	0,17	-0,74	-1,11
8	Интервал	14,73	20,75	16,87	28,48	16,67	9,15	14,59
9	Минимум	0,23	0,72	0,17	0,16	0,37	3,39	0,34
10	Максимум	14,96	21,48	17,04	28,64	17,04	12,54	14,93
11	Сумма	2592,05	2241,1	2145,2	1815,1	2145,5	2678,1	2876,4

При оценке статистических данных наблюдается нелинейная зависимость между средней величиной давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя и углом установки лопаток. Поэтому для нахождения аналитического выражения зависимости величины давления от угла установки лопаток применим полиномиальную зависимость парной регрессии с функцией вида $Y=ax^2+bx+c$.

Усреднённые значения давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя с тремя лопатками и объёма метаемого грунта, приходящегося на квадратный метр площади, полученные на основе экспериментов, приведены в таблица 7.14.

Таблица 7.14 - Результаты экспериментов

Номер опыта	Значение X	Давление Y_3 , МПа	Объем грунта на квадратный метр, м ³
1	-30	9,224	0,085
2	-20	7,975	0,08
3	-10	7,634	0,08
4	0	6,459	0,05
5	10	7,637	0,07
6	20	9,531	0,07
7	30	10,236	0,09

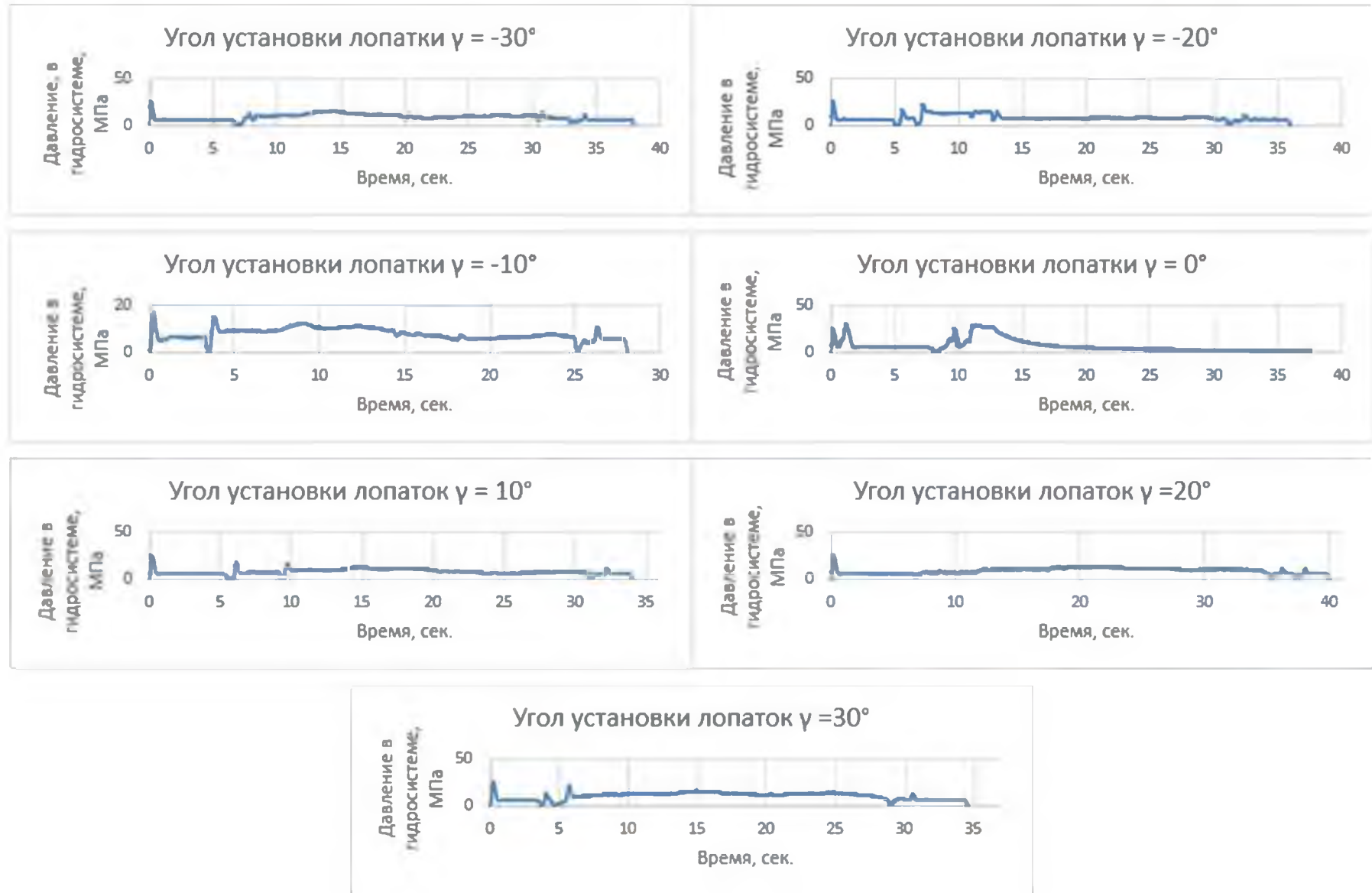


Рисунок 7.25 – Изменение давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя с тремя лопатками

Аналогично методике обработки экспериментальных данных замера давления в гидросистеме привода фрезы-метателя в рамках предыдущих экспериментов, для определения коэффициентов a , b и c регрессионного уравнения используется метод наименьших квадратов, позволяющий составить систему алгебраических уравнений вида (7.10).

Усреднённые значения давления рабочей жидкости в гидроприводе фрезы-метателя с тремя лопатками и объёма метаемого грунта, приходящегося на квадратный метр площади, полученные на основе экспериментов, приведены в таблица 7.14.

Таблица 7.14 - Результаты экспериментов

Номер опыта	Значение X	Давление Yз, МПа	Объем грунта на квадратный метр, м ³
1	-30	9,224	0,085
2	-20	7,975	0,08
3	-10	7,634	0,08
4	0	6,459	0,05
5	10	7,637	0,07
6	20	9,531	0,07
7	30	10,236	0,09

Аналогично методике обработки экспериментальных данных замера давления в гидросистеме привода фрезы-метателя в рамках предыдущих экспериментов, для определения коэффициентов a , b и c регрессионного уравнения используется метод наименьших квадратов, позволяющий составить систему алгебраических уравнений вида (7.10).

Решение данной системы алгебраических уравнений выполним на основе метода Крамера, используемого в случае, когда число уравнений системы равно числу неизвестных, а главный определитель матрицы отличен от нуля.

Применение метода Крамера осуществим на основе алгоритма, реализованного в программе Microsoft Excel. Первоначально составим таблицу для подсчёта сумм при неизвестных в уравнении (7.10) (таблица 7.15).

Таблица 7.15 - Исходные данные для реализации метода Крамера

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-30	9,22					
2	-20	7,97					
3	-10	7,63					
4	0	6,45					
5	10	7,63					
6	20	9,53					
7	30	10,23					
Сумм.							
Среднее							

Рассчитаем необходимые показатели с использованием математических функций программы Microsoft Excel (рисунок 7.26).

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²
1	-30	9.224	900	-27000	810000	-276.72	8301.6	85.08218
2	-20	7.975	400	-8000	160000	-159.5	3190	63.60063
3	-10	7.634	100	-1000	10000	-76.34	763.4	58.27796
4	0	6.459	0	0	0	0	0	41.71868
5	10	7.637	100	1000	10000	76.37	763.7	58.32377
6	20	9.531	400	8000	160000	190.62	3812.4	90.83996
7	30	10.236	900	27000	810000	307.08	9212.4	104.7757
Сумм.	0	58.696	2800	0	1960000	61.51	26043.5	502.6189
Среднее								

Рисунок 7.26 – Результаты расчёта необходимых показателей для реализации метода Крамера в программе Microsoft Excel

На основе рассчитанных показателей сформируем матрицу A, столбцы которой состоят из коэффициентов при неизвестных коэффициентах в левых

частях уравнений системы (7.10)

$$A = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 2800 \\ 0 & 2800 & 0 \\ 2800 & 0 & 7 \end{vmatrix}.$$

По аналогии составим три матрицы A_1, A_2, A_3 , получаемые путём замены столбцов с тем же порядковым номером в исходной матрице на элементы правых частей уравнений системы (7.10). В результате получаем

$$A_1 = \begin{vmatrix} 26043,5 & 0 & 2800 \\ 61,51 & 2800 & 0 \\ 58,696 & 0 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} 1966000 & 26043,5 & 2800 \\ 0 & 61,51 & 0 \\ 2800 & 58,696 & 7 \end{vmatrix};$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} 1966000 & 0 & 26043,5 \\ 0 & 2800 & 61,51 \\ 2800 & 0 & 58,696 \end{vmatrix}.$$

С использованием функции МОПРЕД программы Microsoft Excel вычислим определители для каждой из четырёх составленных матриц (рисунок 7.27).

A=	1960000	0	2800		A2=	1960000	26043.5	2800	D=	16464000000
	0	2800	0			0	61.51	0	D1=	50275960
	2800	0	7			2800	58.696	7	D2=	361678800
									D3=	1.17943E+11
A1=	26043.5	0	2800		A3=	1960000	0	26043.5		
	61.51	2800	0			0	2800	61.51		
	58.696	0	7			2800	0	58.696		

Рисунок 7.27 – Результат расчёта определителей для составленных матриц A, A_1, A_2, A_3

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$, $D_1 = 50275960$, $D_2 = 361678800$, $D_3 = 1.17943 \cdot 10^{11}$. Расчёт коэффициентов a, b и уравнения регрессии был произведён путём введения соответствующих формул в ячейки рабочего листа программы Microsoft Excel (рисунок 7.28).

Записав формулу (7.12) в требуемом для расчёта в Microsoft Excel виде, в итоге получаем, что значение индекса корреляции $R = 0,937$ (рисунок 7.29). Полученное значение, близкое к единице, говорит о тесной связи между величиной давления в гидросистеме привода фрезы-метателя и углом установки её трёх лопаток.

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Ycp) ²
1	-30	9.224	900	-27000	810000	-276.72	8301.6	85.08218	9.252952	0.000838	0.703681306
2	-20	7.975	400	-8000	160000	-159.5	3190	63.60063	7.945786	0.000853	0.168217163
3	10	7.634	100	1000	10000	76.34	763.4	58.27796	7.249357	0.14795	0.564215592
4	0	6.459	0	0	0	0	0	41.71868	7.163667	0.496555	3.710026306
5	10	7.637	100	1000	10000	76.37	763.7	58.12377	7.688714	0.002674	0.559717735
6	20	9.531	400	8000	160000	190.62	3812.4	90.83996	8.8245	0.499142	1.312988592
7	30	10.236	900	27000	810000	307.08	9212.4	104.7757	10.57102	0.112241	3.425672163
Сумм.	0	58.696	2800	0	1960000	61.51	26043.5	502.6189	58.696	1.260255	10.44451886
Среднее	0	8.385143									

A=	1960000	0	2800	A2=	1960000	26043.5	2800	D=	16464000000
	0	2800	0		0	61.51	0	D1=	50275960
	2800	0	7		2800	58.696	7	D2=	361678800
								D3=	1.17943E+11
								R=	0.937730341
A3=	26043.5	0	2800	A3=	1960000	0	26043.5		
	61.51	2800	0		0	2800	61.51		
	58.696	0	7		2800	0	58.696		

Рисунок 7.29 – Результат расчёта индекса корреляции R

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$; $D_1 = 50275960$; $D_2 = 361678800$; $D_3 = 1.17943 \cdot 10^{11}$; $a=0,003$; $b=0,021$; $c=7,16$; $R=0,937$.

В результате вычислений индекс детерминации R^2 равняется 0,879 (рисунок 7.30). То есть в 87,9 % случаев изменения угла установки четырёх лопаток приводят к изменению зависимой переменной Y – давления в гидросистеме. Точность составления уравнения регрессии находится на высоком уровне. Остальные 12,1 % изменения отслеживаемого критерия объясняются факторами, не учтёнными в модели.

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$; $D_1 = 50275960$; $D_2 = 361678800$; $D_3 = 1.17943 \cdot 10^{11}$; $a=0,003$; $b=0,021$; $c=7,16$; $R=0,937$; $R^2=0,87$.

По формуле (7.14) рассчитаем среднюю ошибку аппроксимации A для оценки качества регрессионного уравнения по относительным отклонениям каждого наблюдения.

Запишем данную формулу в соответствующей ячейке в требуемом для расчёта в Microsoft Excel виде и произведём вычисления для каждого значения Y (рисунок 7.30).

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Ycp) ²	
1	-30	9.224	900	-27000	810000	-276.72	8301.6	85.08218	9.252952	0.000838	0.703681306	
2	-20	7.975	400	-8000	160000	-159.5	3190	63.60063	7.945786	0.000853	0.168217163	
3	-10	7.634	100	-1000	10000	-76.34	763.4	58.27796	7.249357	0.14795	0.564215592	
4	0	6.459	0	0	0	0	0	41.71868	7.163667	0.496555	3.710026306	
5	10	7.637	100	1000	10000	76.37	763.7	58.32377	7.688714	0.002674	0.559717735	
6	20	9.531	400	8000	160000	190.62	3812.4	90.83996	8.8245	0.499142	1.312988592	
7	30	10.236	900	27000	810000	307.08	9212.4	104.7757	10.57102	0.112241	3.425672163	
Сумм.	0	58.696	2800	0	1960000	61.51	26043.5	502.6189	58.696	1.260255	10.44451886	
Среднее	0	8.385143										
A=	1960000	0	2800			1960000	26043.5	2800	D=	16464000000		
	0	2800	0		A2=	0	61.51	0	D1=	50275960	a=	0.003054
	2800	0	7			2800	58.696	7	D2=	361678800	b=	0.021908
									D3=	1.17943E+11	c=	7.163667
									R=	0.937730341		
A1=	26043.5	0	2800		A3=	1960000	0	26043.5	R2=	0.879338192		
	61.51	2800	0			0	2800	61.51				
	58.696	0	7			2800	0	58.696				

Рисунок 7.30 – Результат расчёта индекса детерминации R^2

№	X	Y	X ²	X ³	X ⁴	X*Y	X ² *Y	Y ²	Y*	(Y-Y*) ²	(Y-Ycp) ²	ABS
1	-30	9.224	900	-27000	810000	-276.72	8301.6	85.08218	9.252952	0.000838	0.703681306	0.313881
2	-20	7.975	400	-8000	160000	-159.5	3190	63.60063	7.945786	0.000853	0.168217163	0.366323
3	-10	7.634	100	-1000	10000	-76.34	763.4	58.27796	7.249357	0.14795	0.564215592	5.038549
4	0	6.459	0	0	0	0	0	41.71868	7.163667	0.496555	3.710026306	10.90984
5	10	7.637	100	1000	10000	76.37	763.7	58.32377	7.688714	0.002674	0.559717735	0.677154
6	20	9.531	400	8000	160000	190.62	3812.4	90.83996	8.8245	0.499142	1.312988592	7.412653
7	30	10.236	900	27000	810000	307.08	9212.4	104.7757	10.57102	0.112241	3.425672163	3.272995
Сумм.	0	58.696	2800	0	1960000	61.51	26043.5	502.6189	58.696	1.260255	10.44451886	
Среднее	0	8.385143										3.998771
A=	1960000	0	2800			1960000	26043.5	2800	D=	16464000000		
	0	2800	0		A2=	0	61.51	0	D1=	50275960	a=	0.003054
	2800	0	7			2800	58.696	7	D2=	361678800	b=	0.021968
									D3=	1.17943E+11	c=	7.163667
									R=	0.937730341		
A1=	26043.5	0	2800		A3=	1960000	0	26043.5	R2=	0.879338192		
	61.51	2800	0			0	2800	61.51				
	58.696	0	7			2800	0	58.696				

Рисунок 7.31 – Результат расчёта средней ошибки аппроксимации A

В результате вычислений установлены определители (детерминанты) для составленных матриц: $D = 16464000000$; $D_1 = 50275960$; $D_2 = 361678800$; $D_3 = 1.17943 \cdot 10^{11}$; $a=0,003$; $b=0,021$; $c=7,16$; $R=0,937$; $R^2=0,87$.

Результаты вычислений обозначают, что величина средней ошибки аппроксимации на уровне 3,99 %. Дозволимым обозначена величина ошибки аппроксимации не более 8-10 %.

Графическое отображение полученных показаний по итогам проведенного анализа зависимости показаний угла установки четырех метательных лопаток на значение гидравлического в виде полинома второй степени показано на рисунке 7.32.

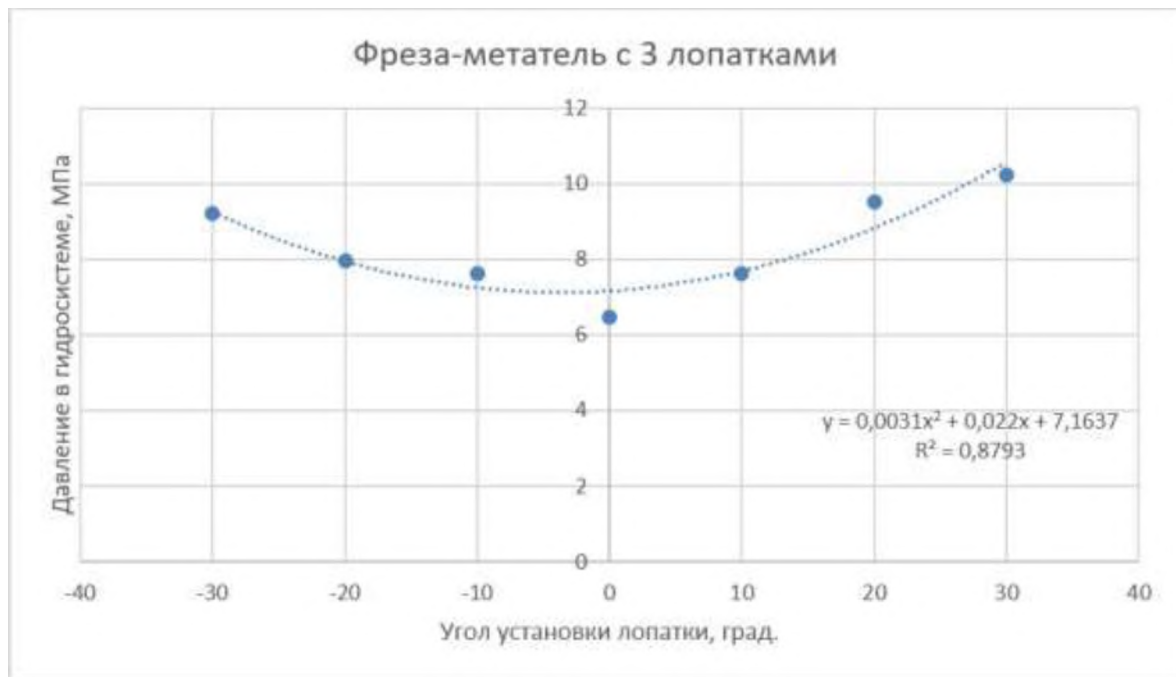


Рисунок 7.32 – Зависимость влияния угла установки трех лопаток фрезы-метателя на величину давления её гидропривода

Для наглядной оценки величины давления рабочей жидкости P в гидроприводе фрезы-метателя с различным числом лопаток от угла их установки γ совместим 3 графика на одной координатной плоскости (рисунок 7.33).

По найденным показаниям требуется выполнить расчет экспериментальной задачи оптимизации

$$P(\gamma) \rightarrow \min. \quad (7.15)$$

Исследование графического изображения полученных данных позволяет

определить, что показания характеристики гидравлического давления от 9 до 11 МПа в системе, и как следствие, повышенная величина нагрузки на фрезерно-метательный рабочий орган отражена при фиксации летающих лопаток в крайних показаниях с углом $\pm 30^\circ$. В случае, если летающие лопатки устанавливаются в районе нулевой отметки, то по графическому изображению возможно отследить минимальные всплески гидравлической жидкости на уровне 6...8 МПа.

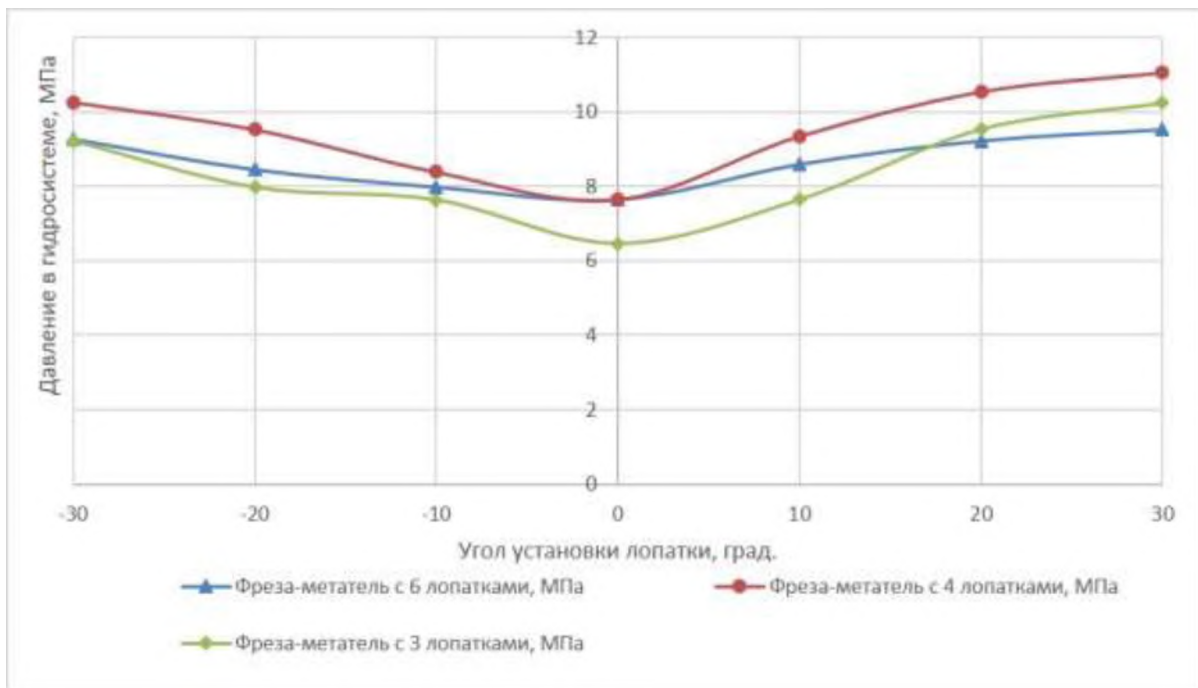


Рисунок 7.33 – Зависимость влияния угла установки лопаток на давление в гидроприводе фрезы-метателя с 6, 4 и 3 лопатками

В том числе еще одним значимым параметром, контролируемым в процессе экспериментальных исследований, влияющим на эффективность показателя метания грунта грунтометательной машиной, является показатель объема потока грунта в расчете на квадратный метр. Показания, фиксируемые в процессе исследования, занесены в таблицу 7.17.

Таблица 7.17 - Результаты экспериментальных замеров объема метаемого грунта

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

Для удобного анализа полученные данные были представлены в виде гистограммы (рисунок 7.34).

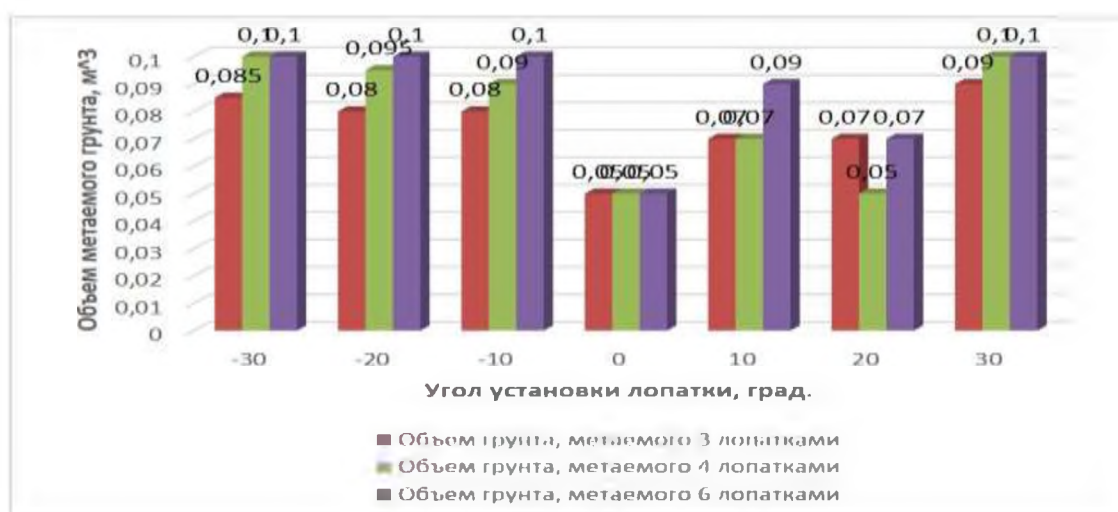


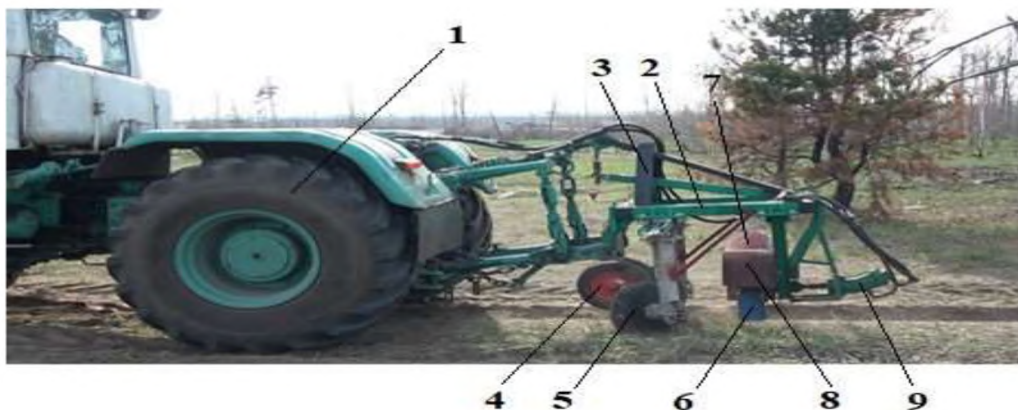
Рисунок 7.34 – Гистограмма распределения объема метаемого грунта фрезой-метателем с 6, 4 и 3 лопатками в зависимости от угла их установки

7.2. Корреляционно-регрессионный анализ результатов разведывательного эксперимента

Экспериментальное исследование – один из важных этапов разработки рабочих органов грунтометательной машины. Методика факторного планирования эксперимента позволяет получить регрессионные модели, с высокой адекватностью описывающие рабочие процессы машины, что позволяет выполнить оптимизацию параметров орудия и существенно сократить временные и экономические затраты на разработку машины.

Целью настоящего экспериментального исследования является изучение влияния параметров грунтометательной техники на показатели её работы и оптимизация этих параметров.

На основе предварительных аналитических исследований был реализован полевой разведывательный эксперимент [203], в котором изучалось влияние параметров грунтометательной машины (рисунок 7.35) на четыре выходных показателя эффективности процесса тушения очага горения.



1 – трактор Т-150К; 2 – рама; 3 – навесное устройство; 4 – опорные колеса; 5 – дисковые рабочие органы; 6 – фреза-метатель; 7 – направляющий кожух; 8 – защитный каркас; 9 – гидромотор фрезы-метателя

Рисунок 7.35 – Экспериментальный образец грунтометательной машины:

Параметры грунтометательной машины, принятые за факторы, влияющие на качество тушения очага горения:

X_1 – угол атаки сферических дисков (α), град.;

X_2 – угол установки сферических дисков в вертикальной плоскости (β), град.;

X_3 – расстояние поперечного смещения дисковых рабочих органов (r_d), см;

X_4 – глубина хода сферических дисков (a), см;

X_5 – угол установки кожуха-направителя (φ), град.;

X_6 – скорость движения базовой грунтометательной машины (V), м/с.

Выходные показатели эффективности процесса тушения очага лесного низового пожара:

Y_1 – полнота тушения очага лесного пожара на расстоянии 3 метра от базовой грунтометательной машины, %;

Y_2 – полнота тушения очага лесного пожара на расстоянии 6 метров от базовой грунтометательной машины, %;

Y_3 – дальность метания грунта, м;

Y_4 – масса метаемого грунта на расстоянии 3 метров от базовой грунтометательной машины, м³.

Таблица 7.18 - Данные разведывательного эксперимента с натуральными значениями факторов и откликов

№	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	Y2	Y3	Y4
1	30	0	50	15	45	1,4	0	0	8	0,101
2	45	30	50	15	45	1,4	60	100	12	0,108
3	30	30	50	5	45	1,4	70	70	10	0,104
4	30	30	30	5	30	1,4	70	20	5	0,05
5	30	0	30	15	30	1,4	100	60	10	0,104
6	30	30	40	5	30	0,83	0	100	10	0,18
7	30	30	40	10	30	0,83	100	100	7	0,23
8	30	15	40	15	45	0,83	100	70	6	0,1009

На основе данных разведывательного исследования построена корреляционная матрица.

Таблица 7.19 - Корреляционная матрица

№	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	Y2	Y3	Y4
1	1									
2	0,275	1								
3	0,423	0,116	1							
4	0,356	-0,688	0,151	1						
5	0,377	-0,145	0,800	0,404	1					
6	0,292	-0,263	0,124	0,104	0,258	1				
7	-0,024	0,046	-0,421	0,198	-0,128	-0,082	1			
8	0,374	0,556	0,113	-0,095	-0,141	-0,547	0,254	1		
9	0,591	0,032	0,465	0,150	0,223	0,288	-0,258	0,474	1	
10	-0,102	0,279	0,112	-0,109	-0,358	-0,710	-0,022	0,662	0,146	1

Таблица 7.20 - Описательная статистика

№	Параметры распределения	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
		1	Среднее	31,87	20,62	41,25	10,62	37,5
2	Стандартная ошибка	1,87	4,85	2,95	1,75	2,83	0,10	1,87
3	Медиана	30	30	40	12,5	37,5	1,4	30
4	Стандартное отклонение	30	30	50	15	45	1,4	30
5	Дисперсия выборки	5,30	13,74	8,34	4,95	8,02	0,29	5,30
6	Экссесс	28,12	188,84	69,64	24,55	64,28	0,1	28,12
7	Асимметричность	8	-1,04	-1,39	-2,36	-2,8	-2,24	8
8	Интервал	2,83	-0,1	-0,27	-0,31	0	-0,64	2,83
9	Минимум	15	30	20	10	15	0,57	15
10	Максимум	30	0	30	5	30	0,83	30
11	Сумма	45	30	50	15	45	1,4	45

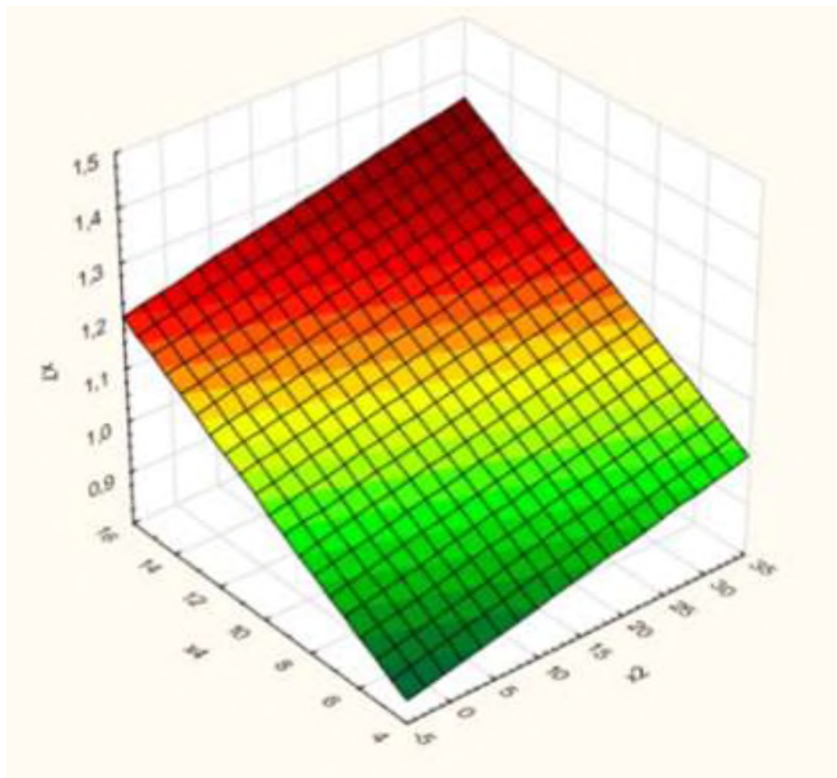


Рисунок 7.36 – Корреляционная зависимость факторов X_2 , X_4 , X_7

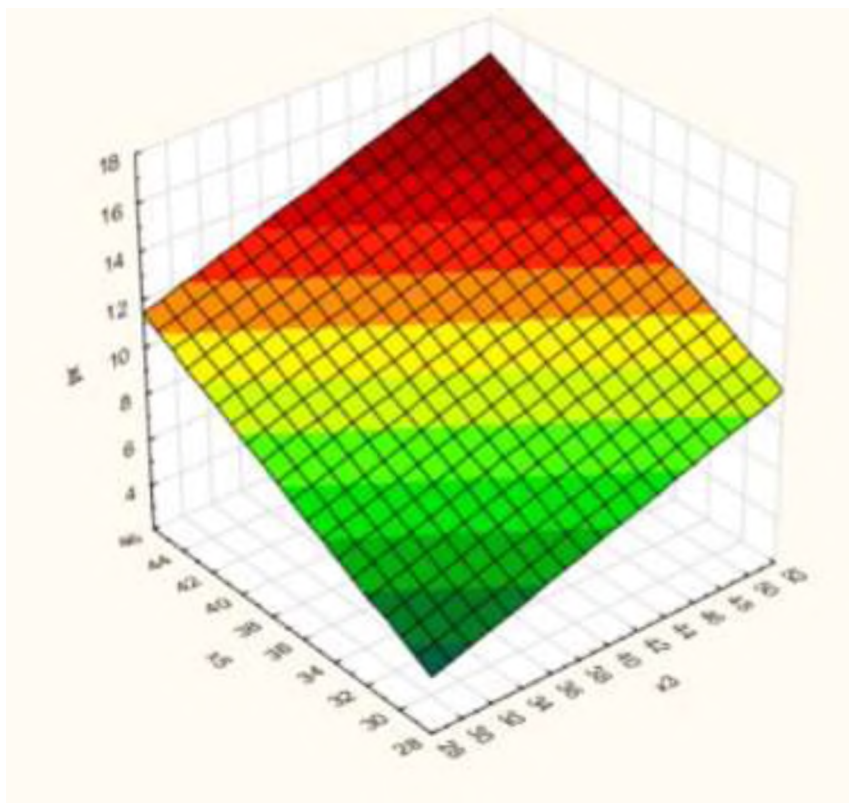


Рисунок 7.37 – Корреляционная зависимость факторов X_3 , X_4 , X_5

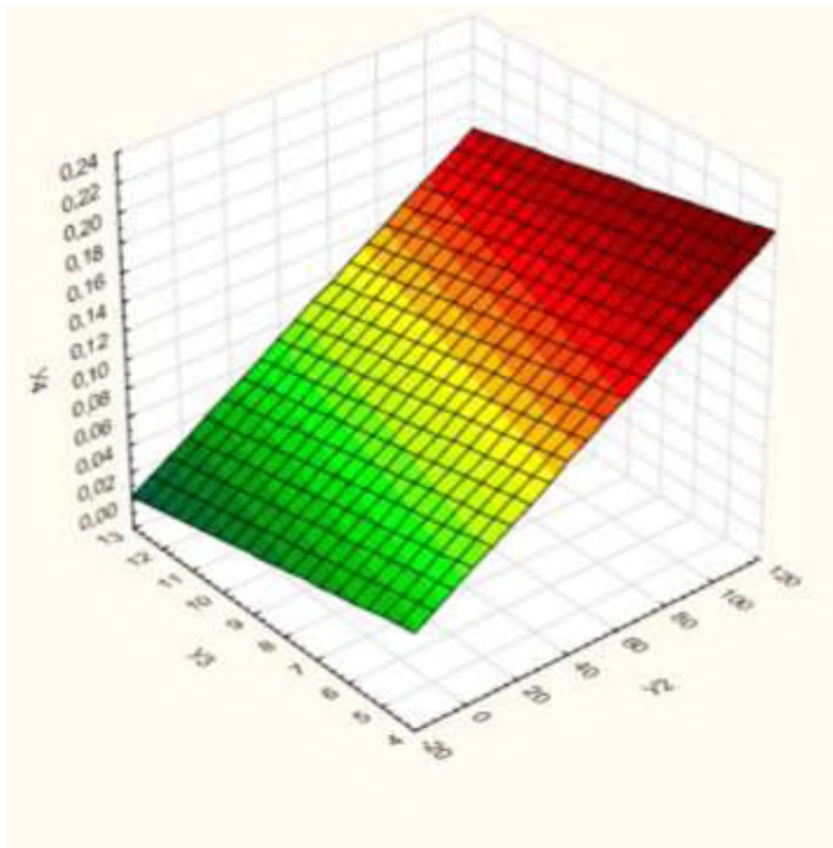


Рисунок 7.38 – Корреляционная зависимость откликов U_2 , U_3 , U_4

Анализ данных и графиков зависимостей, построенных на их основе, показал, согласно шкале Чеддока, что фактор X_1 имеет заметную корреляционную зависимость со всеми факторами и умеренную связь с откликом U_2 и заметную с U_3 ; фактор X_2 – высокую с фактором X_4 , заметную с откликом U_2 и умеренную с откликом U_4 ; X_3 – высокую с фактором X_5 и умеренную с откликами U_1 и U_3 ; фактор X_4 – умеренную с фактором X_5 и слабую со всеми откликами; X_5 – слабую со всеми откликами; X_6 – сильную с откликом U_2 и U_4 ; отклик U_2 – умеренную с откликом U_3 и сильную с откликом U_4 .

Для решения вопроса об исключении из рассмотрения факторов X_4 и X_5 проведен регрессионный анализ обобщенной функции откликов U_1 и U_2 , предварительно выполнена нормализация факторов и нормирование откликов по сумме.

Выражение для нормализации факторов (переменных):

$$Z_i = \frac{(x_i - M_x)}{\sigma_x},$$

где Z_i – нормализованное значение фактора;

x_i – натуральное значение фактора;

σ_x – стандартное отклонение;

M_x – среднее.

Таблица 7.21 - Шкала Чеддока

Количественная мера тесноты связи	Качественная характеристика силы связи
0,1-0,3	Слабая
0,3-0,5	Умеренная
0,5-0,7	Заметная
0,7-0,9	Высокая
0,9-0,99	Весьма высокая

Выражение для нормирования откликов:

$$y_i^{\text{норм}} = \frac{y_i}{\sum y_i}, \quad \sum y_i^{\text{норм}} = 1$$

где $y_i^{\text{норм}}$ – нормированное значение отклика;

y_i – натуральное значение отклика.

Таблица 7.22 - Нормализованные значениями факторов и нормированные значения откликов

X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y1	Y2
1	2	3	4	5	6	7	8
-0,35	-1,5	1,04	0,88	0,93	0,72	0	0
2,47	0,68	1,04	0,88	0,93	0,72	0,12	0,19
Окончание таблицы 7.22							

1	2	3	4	5	6	7	8
-0,35	0,68	1,04	-1,13	0,93	0,72	0,14	0,13
-0,35	0,68	-1,34	-1,13	-0,93	0,72	0,14	0,038
-0,35	-1,5	-1,34	0,88	-0,93	0,72	0,2	0,11
-0,35	0,68	-0,14	-1,13	-0,93	-1,2	0	0,19
-0,35	0,68	-0,14	-0,12	-0,93	-1,2	0,2	0,19
-0,35	-0,4	-0,14	0,88	0,93	-1,2	0,2	0,13

В программе Excel рассчитаны коэффициенты расчетных линейных регрессионных моделей полноты тушения лесного низового пожара:

А) на расстоянии 3 м от базовой грунтометательной машины четырех факторов:

$$y^{(4)}_{1расч} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_7X_7$$

a7	a3	a2	a1	a0
-0,0059	-0,041	0,0026	0,016	0,125

Б) на расстоянии 3 м от базовой грунтометательной машины шести факторов:

$$y^{(6)}_{1расч} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6$$

a6	a5	a4	a3	a2	a1	a0
114,035	0,66	20	-3	7,33	-12,33	55,35

В) на расстоянии 6 м от базовой грунтометательной машины четырех факторов:

$$y^{(4)}_{2расч} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_7X_7$$

a7	a3	a2	a1	a0
-0,0059	-0,041	0,0026	0,0166	0,125

Г) на расстоянии 6 м от базовой грунтометательной машины шести факторов:

$$y^{(6)}_{2расч} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6$$

a7	a5	a4	a3	a2	a1	a0
-0,043	-0,023	3,29*10 ⁻¹⁷	0,014	0,013	0,039	0,125

На основе расчетных линейных регрессионных моделей определены значения обобщенных функции $Q^{(4)}$, $Q^{(6)}$ соответственно от четырех и шести факторов:

$$Q^{(6)} = y^{(6)}_{1расч} + y^{(6)}_{2расч}, \quad Q^{(4)} = y^{(4)}_{1расч} + y^{(4)}_{2расч}$$

Таблица 7.23 - Сравнение значений обобщенных функций от 4 и 6 факторов

$Q^{(4)}_i$	$Q^{(6)}_i$	ε_i
0,11	0,109	0,036
0,31	0,312	1,78*10 ⁻¹⁶
0,16	0,17	0,063
0,27	0,28	0,03
0,22	0,21	0,051
0,31	0,34	0,082
0,31	0,33	0,054
0,29	0,31	0,064

Выражения для расчета относительной ошибки:

$$\varepsilon_i = \frac{|Q^{(6)}_i - Q^{(4)}_i|}{Q^{(6)}_i}$$

Выражения для расчета средней относительной ошибки:

$$\varepsilon_{cp} = \sum_i^N \varepsilon_i / N, \quad i - \text{номер опыта}, \quad N = 8 - \text{число опытов}$$

Основываясь на проведенном корреляционно-регрессионном анализе, было принято решение исключить из дальнейшего рассмотрения факторы X_4 и X_5 , имеющие сильную корреляционную зависимость с факторами X_2 и X_3 и слабую корреляцию со всеми откликами. Также исключить из рассмотрения отклики Y_3 и Y_4 , имеющие сильную корреляционную зависимость с откликом Y_2 , при этом средняя относительная ошибка рассмотрения обобщенного отклика от 4 факторов вместо обобщенного отклика от 6 факторов составляет менее 5 %.

7.3. Экспериментальное исследование воздействия характеристик базовой грунтометательной машины на показатели её работы

7.3.1. Анализ экспериментальных данных по выявлению закона распределения выходных величин

Исследования предполагали построение регрессионных моделей влияния параметров базовой грунтометательной машины на выходные показатели эффективности процесса тушения лесного пожара.

Для решения поставленной задачи на основании разведывательного исследования был выбран дробный факторный план (ДФП), позволяющий рассчитать коэффициенты уравнения регрессии, получив полиномиальную математическую модель и сократить объем экспериментальных данных [200, 201]. Для уменьшения числа опытов из множества точек факторного пространства может быть отобрана их некоторая часть, содержащая подходящее число опытов и представляющая собой дробный факторный план.

При этом коэффициенты взаимодействий факторов, начиная с тройных взаимодействий факторов, часто не значимы, исходя из этого было принято решение реализовать ДФП 2^{4-1} .

За основные варьируемые факторы были приняты:

X_1 – угол атаки сферических дисков (α), град.;

X_2 – угол установки сферических дисков в вертикальной плоскости (β), град.

X_3 – расстояние поперечного смещения дисковых рабочих органов (r_0), см.

За дополнительный варьируемый фактор – генератор плана был принят:

X_4 – скорость движения агрегата (V), м/с.

Дополнительные факторы определим, как тройное взаимодействие основных факторов.

Обозначение факторов и их уровни представлены в таблица 7.24.

Функции отклика:

y_1 – полнота тушения лесного низового пожара на расстоянии 3 метров от базовой грунтометательной машины, % (ближняя зона);

y_2 – полнота тушения лесного низового пожара на расстоянии 6 метров от базовой грунтометательной машины, % (дальняя зона).

Для проверки закона нормального распределения выходной величины Y_1 была проведена серия из 30 опытов при $X_1 = 30^0$, $X_2 = 30^0$, $X_3 = 50$ см, $X_4 = 0,83$ м/с. Результаты этой серии представлены в таблица 7.8.

Статистическая обработка результатов данной серии была проведена с использованием программы Excel (таблица 7.9), расчетные значения асимметричности $As_{расч} = -0,07$, эксцесса $Ex_{расч} = 0,809$. Табличные критические значения по абсолютной величине больше расчетных $As_{крит} > As_{расч}$ и $Ex_{крит} > Ex_{расч}$ ($0,661 > -0,07$; $0,865 > 0,809$), что свидетельствует в пользу гипотезы о нормальном распределении выходной величины.

Для уточнения гипотезы о нормальности распределения функции отклика y_1 проведем проверку по критерию χ^2 -Пирсона. Для этого разбиваем выборку на 6 интервалов (таблица 7.25), количество интервалов (групп разбиения) определяется расчетом по формуле Стёрджесса:

$$m = 1 + 3,222 \cdot \lg N = 1 + 3,222 \cdot \lg 30 \approx 6$$

где m – количество интервалов;

N – число опытов.

Таблица 7.24 - Определение уровней и интервалов варьирования факторов

Фактор		Уровни факторов			Интервал варьирования	
Наименование	Обозначение		верхний	основной		нижний
	Натуральное	Нормализованное				
Угол атаки сферических дисков, град.	α	X_1	45	37,5	30	7,5
Угол установки сферических дисков в вертикальной плоскости, град	β	X_2	30	15	15	15
Расстояние поперечного смещения дисковых рабочих органов, см	r_0	X_3	50	40	30	10
Скорость движения агрегата, м/с	V	X_4	1,4	1,115	0,83	0,255

Таблица 7.25 - Результаты серии опытов

№	$y_1, \%$	№	$y_1, \%$	№	$y_1, \%$
1	2	3	4	5	6
1	16	11	24	21	16
2	20	12	22	22	26
1	2	3	4	5	6
3	19	13	20	23	22
4	16	14	24	24	22
5	21	15	20	25	20
6	16	16	18	26	28
7	16	17	18	27	22
8	9	18	21	28	19
9	25	19	24	29	31
10	24	20	28	30	18

Таблица 7.26 - Статистические характеристики

Среднее	20,8
Стандартная ошибка	0,82
Стандартное отклонение	4,62
Дисперсия выборки	21,34
Эксцесс	0,809
Асимметричность	-0,07

Таблица 7.27 - Расчет χ^2 -критерия Пирсона

Интервал	Левый конец интер- вала	Правый конец интерв- ала	Сере- дина интер- вала	Частота (p_i)	$p_i(y_i - y_{cp})^2$	Частоты теорети- ческие ($p_{i\text{теор}}$)	$(p_i - p_{i\text{теор}})^2 / p_{i\text{теор}}$
1	9	12,7	10,85	2	97,35	1,19	0,03
2	12,7	16,4	14,55	3	190,13	4,09	0,2
3	16,4	20,1	18,25	12	54,76	7,95	0,13
4	20,1	23,8	21,95	9	9,126	8,756	0,86
5	23,8	27,5	25,65	2	146,02	5,44	0,05
6	27,5	31,2	29,35	2	223,60	1,91	0,61

Расчетное значение критерия χ^2 -Пирсона составило 1,9. Табличное значение критерия χ^2 -Пирсона для данной выборки равно 7,815, исходя из $7,815 > 1,9$, принимаем гипотезу нормального распределения случайной величины.

Определим необходимое количество дублированных опытов (n) для дробного факторного плана (ДФП 2^{4-1}) по выражению:

$$n = \frac{t^2 \cdot S_x^2 \cdot N}{t^2 \cdot S_x^2 + \Delta^2 \cdot N} = 3.92 \rightarrow 4$$

где S_x^2 , t , Δ , N – соответственно дисперсия, критерий Стьюдента, относительное отклонение отклика, предельная ошибка выборки, число опытов плана ДФП 2^{4-1} .

7.3.2. Построение регрессионной модели влияния на полноту тушения лесного низового пожара базовой грунтометательной машиной

Матрица планирования эксперимента по определению полноты тушения лесного низового пожара на расстоянии 3 и 6 метров от базовой грунтометательной машины и результаты опытов представлены в таблица 7.28.

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

Таблица 7.28 - Матрица планирования эксперимента

№	Рандомизация (4 серии)				X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₄ = X ₁ X ₂ X ₃	\bar{y}_{1j}	S_{1j}^2	\bar{y}_{2j}	S_{2j}^2
	1	2	3	4											
1	4	2	1	6	-1	-1	-1	1	1	1	-1	50,4	12,3	69,6	13,3
2	2	9	2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	94,4	14,3	70	14,5
3	3	4	8	9	-1	1	-1	-1	1	-1	1	4	17,5	3,6	12,3
4	7	6	9	5	1	1	-1	1	-1	-1	-1	99,2	3,2	94,8	1,2
5	9	8	5	4	-1	-1	1	1	-1	-1	1	90,4	5,3	79,8	10,2
6	8	5	7	2	1	-1	1	-1	1	-1	-1	100	0	83	8
7	1	7	4	3	-1	1	1	-1	-1	1	-1	20,2	15,7	15,2	12,7
8	5	3	1	7	1	1	1	1	1	1	1	93,6	19,3	67,2	9,7

где $\bar{y}_{1j}, \bar{y}_{2j}, S_{1j}^2, S_{2j}^2$ – соответственно средние значения и дисперсия первого и второго откликов в каждом опыте.

Таблица 7.29 - Коэффициенты регрессии математической модели

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃
69,025	27,78	-14,8	7,03	1,575	14,375	-7,025	-4,375

Определяем дисперсию коэффициентов регрессии: $S^2\{b_i\} = 0,342$.

Для коэффициентов регрессии среднеквадратичное отклонение составляет:

$$S\{b_i\} = 0,585.$$

Значимость коэффициентов регрессии проводим согласно неравенству:

$$|b_i| \leq t_{\text{табл}} S\{b_i\}.$$



а)



б)



в)

а) до прохода; б) процесс тушения; в) после прохода

Рисунок 7.39 – Полевые исследования (образец):

Из таблиц t-распределения Стьюдента выбираем значение $t_{\text{табл}}$ при уровне значимости $q = 0,01$ и числе степеней свободы $f_y = 24$; отсюда: $t_{\text{табл}} = 2,8$.

Тогда: $t_{\text{табл}}S\{b_{ij}\} = 1,64$. Вышеуказанное соотношение не выполняется для коэффициента b_4 ($1,57 < 1,64$), следовательно, этот коэффициент будем считать незначимыми, а член при данном коэффициенте исключаем из выражения.

Отбросив незначимые члены, получим регрессионную модель в виде:

$$y_1 = 69 + 27,78x_1 - 14,8x_2 + 7,03x_3 + 14,38x_1x_2 - 7,03x_1x_3 - 4,38x_2x_3 \quad (7.1)$$

Адекватность полученной модели проверим по F-критерию Фишера ($F_{\text{табл}}$), если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то модель считается адекватной. В нашем случае расчетное значение $F_{\text{расч}} = 3,62$, а $F_{\text{табл}} = 4,26$, условие $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ ($3,62 < 4,26$) выполняется, следовательно, модель адекватна и может быть использована для описания объекта исследования.

Регрессионную модель влияния параметров базовой грунтометательной машины на полноту тушения лесного низового пожара на расстоянии 6 метров от базовой грунтометательной машины будем искать в виде многочленов:

$$y_2 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$$

Предварительно по G-критерию Кохрена проводим проверку однородности дисперсий опытов. Наибольшая дисперсия второго опыта $S_8^2 = 14,5$.

$$\text{Отсюда: } G_{\text{расч}} = 0,177.$$

По таблице распределения критерия Кохрена для нашего случая находим $G_{\text{табл}} = 0,52$. Неравенство $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ ($0,177 < 0,52$) позволяет сделать вывод об однородности дисперсий опытов.

Расчетные коэффициенты регрессионной модели представлены в табл. 7.30.

Таблица 7.30 - Коэффициенты регрессии математической модели

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{23}
60,4	18,35	-15,2	0,9	-5,25	17,45	-4,55	-4,9

Определяем дисперсию коэффициентов регрессии: $S^2\{b_i\} = 0,32$.

Для коэффициентов регрессии среднеквадратичное отклонение составляет:
 $S\{b_i\} = 0,566$.

Значимость коэффициентов регрессии проводим согласно неравенству:
 $|b_i| \leq t_{\text{табл}} S\{b_i\}$.

Из таблиц t-распределения Стьюдента выбираем значение $t_{\text{табл}}$ при уровне значимости $q = 0,01$ и числе степеней свободы $f_y = 24$; тогда: $t_{\text{табл}} = 2,8$.

Следовательно: $t_{\text{табл}} S\{b_i\} = 1,58$.

Вышеуказанное соотношение не выполняется для коэффициента b_3 ($0 < 1,58$), следовательно, этот коэффициент будем считать незначимыми, а показатель при данном коэффициенте исключаем из выражения.

Отбросив незначимые члены, получим регрессионную модель в виде:

$$y_2 = 60,4 + 18,35x_1 - 15,2x_2 + 17,45x_1x_2 - 4,55x_1x_3 - 4,9x_2x_3 - 5,25x_7 \quad (7.2)$$

Адекватность полученной модели проверим по F-критерию Фишера ($F_{\text{табл}}$), если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то модель считается адекватной. В нашем случае расчетное значение $F_{\text{расч}} = 1,27$, а $F_{\text{табл}} = 4,26$, условие $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ ($1,27 < 4,26$) выполняется, следовательно, модель адекватна и может быть использована для описания объекта исследования.

Используя выражение:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{I_i}$$

Можем при необходимости построить уравнения регрессии в натуральном виде,

где X_i , x_i – соответственно нормализованное и натуральное значение фактора;

I_i – интервал варьирования;

x_{i0} – натуральное значение основного уровня.

7.3.3. Анализ влияния параметров базовой грунтометательной машины на полноту тушения лесного низового пожара

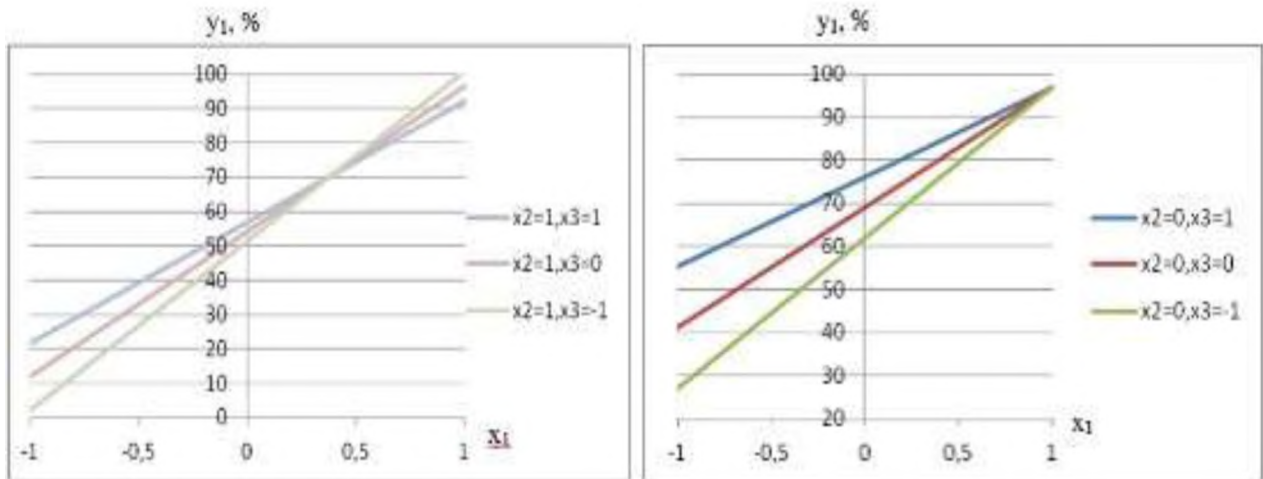
Проанализировав воздействие основных факторов, влияющих на полноту тушения лесного низового пожара при десантировании МТА от кромки на расстоянии 3 м по полученной модели (7.1), можно отметить:

1) самое значимое влияние оказывает изменение угла атаки сферических дисков (x_1), рассмотрим влияние на полноту тушения лесного низового пожара изменения x_1 при различных фиксированных значениях x_2 и x_3 :

а) при больших углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_1 очень сильно, при $x_2 = 1$ и $x_3 = 1,0,-1$ – с увеличением x_1 полнота тушения лесного низового пожара сильно увеличивается, причем чем меньше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

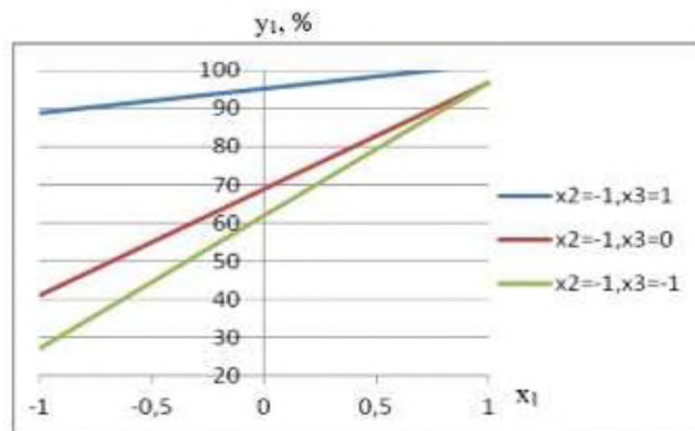
б) при средних углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_1 сильно, при $x_2 = 0$ и $x_3 = 1,0,-1$ – с увеличением x_1 полнота тушения лесного низового пожара сильно увеличивается, причем чем меньше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

в) при малых углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_1 существенно, при $x_2 = -1$ и $x_3 = 0, -1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара заметно повышается, причем чем меньше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше, при $x_3 = 1$ – изменения x_2 слабо влияют на изменение полноты тушения лесного низового пожара;



а)

б)



в)

Рисунок 7.40 – Зависимость влияния угла атаки сферических дисков (x_1) на полноту тушения лесного низового пожара очага возгорания при различных фиксированных значениях x_2 и x_3

2) существенное – изменение угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2), рассмотрим влияние на полноту тушения лесного низового пожара изменения x_2 при различных фиксированных значениях x_1 и x_3 :

а) при больших углах атаки сферических дисков (x_1) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_2 несущественно, при $x_1 = 1$ и $x_3 = 1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара снижается, при $x_1 = 1$ и $x_3 = 0$ – x_2

практически не влияет на полноту тушения лесного низового пожара, при $x_1 = 1$ и $x_3 = -1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара повышается;

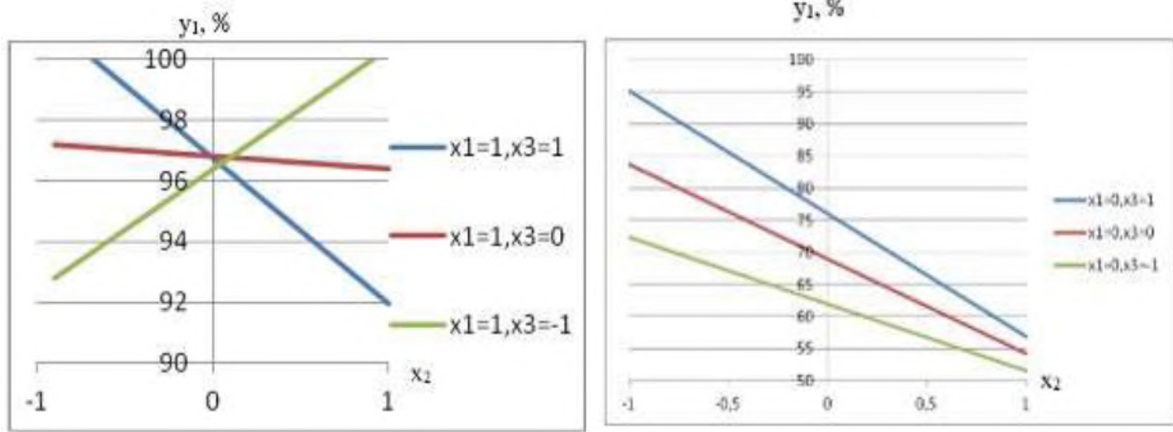
б) при средних углах атаки сферических дисков (x_1) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_2 заметно, при $x_1 = 0$ и $x_3 = 1, 0, -1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара снижается, причем чем больше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

в) при малых углах атаки сферических дисков (x_1) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) изменения x_2 существенно, при $x_1 = -1$ и $x_3 = 1, 0, -1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара снижается, причем чем больше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

3) заметное – изменение расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3), рассмотрим влияние на полноту тушения лесного низового пожара изменения x_3 при различных фиксированных значениях x_1 и x_2 :

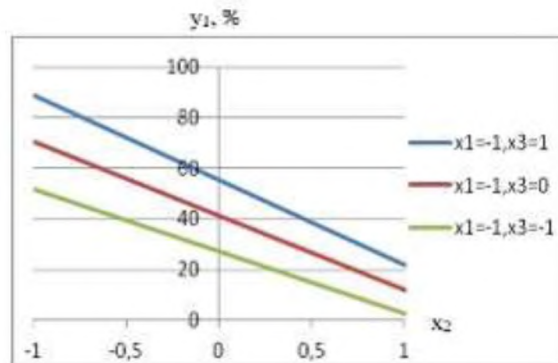
а) при больших углах атаки сферических дисков (x_1) и различных углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) влияние изменения x_3 несущественно, при $x_1 = 1$ и $x_2 = 1$ – с увеличением x_3 полнота тушения лесного низового пожара снижается, при $x_1 = 1$ и $x_2 = 0$ – x_3 не влияет на полноту тушения лесного низового пожара, при $x_1 = 1$ и $x_2 = -1$ – с увеличением x_3 полнота тушения лесного низового пожара повышается;

б) при средних углах атаки сферических дисков (x_1) и различных углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) влияние изменения x_3 несущественно, при $x_1 = 0$ и $x_2 = 1$ – с увеличением x_3 полнота тушения лесного низового пожара слабо повышается, при $x_1 = 0$ и $x_2 = 0$ – x_3 не влияет на полноту тушения лесного низового пожара, при $x_1 = 0$ и $x_2 = -1$ – с увеличением x_3 полнота тушения лесного низового пожара заметно повышается;



а)

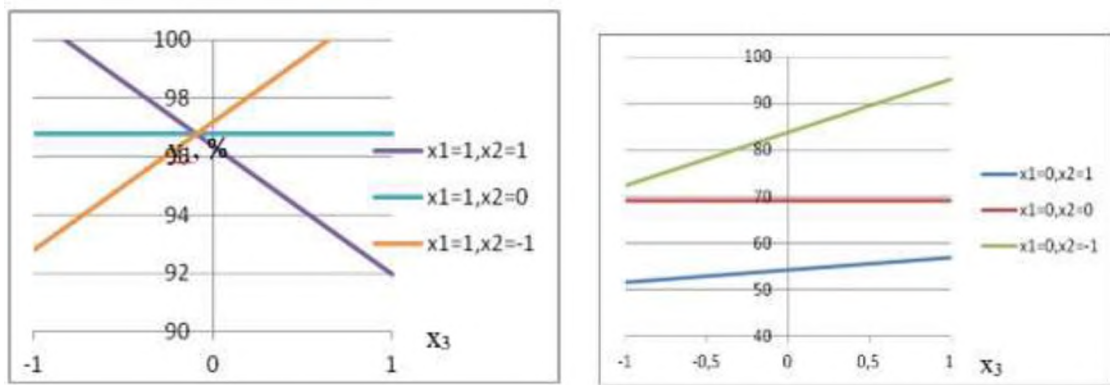
б)



в)

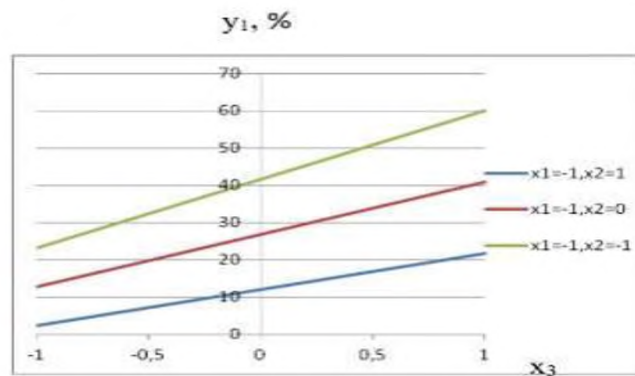
Рисунок 7.41 – Зависимость влияния угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) на полноту тушения лесного низового пожара очага возгорания при различных фиксированных значениях x_1 и x_3

в) при малых углах атаки сферических дисков (x_1) и различных углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) влияние изменения x_3 заметно, при $x_1 = -1$ и $x_2 = 1, 0, -1$ – с увеличением x_3 полнота тушения лесного низового пожара повышается, причем чем больше x_2 тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;



а)

б)



в)

Рисунок 7.42 – Зависимость влияния расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) на полноту тушения лесного низового пожара очага возгорания при различных фиксированных значениях x_1 и x_2

4) существенное – парное взаимодействие угла атаки сферических дисков (x_1) и угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2), рассмотрим влияние парного взаимодействия угла атаки сферических дисков (x_1) и угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) при различных фиксированных значениях расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3):

а) при больших расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов $x_3 = 1$ – с одновременным увеличением x_1 и x_2 заметно изменяется полнота тушения лесного низового пожара, с одновременным увеличением x_1 и x_2 до их средних значений полнота тушения лесного низового пожара снижается,

при дальнейшем одновременном увеличении x_1 и x_2 до их максимальных значений полнота тушения лесного низового пожара повышается;

б) при средних расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов $x_3 = 0$ – с одновременным увеличением x_1 и x_2 заметно изменяется полнота тушения лесного низового пожара, с одновременным увеличением x_1 и x_2 , сначала полнота тушения лесного низового пожара незначительно снижается, при дальнейшем одновременном увеличении x_1 и x_2 до их максимальных значений полнота тушения лесного низового пожара существенно повышается;

в) при малых расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов $x_3 = -1$ – с одновременным увеличением x_1 и x_2 заметно изменяется полнота тушения лесного низового пожара, с одновременным увеличением x_1 и x_2 полнота тушения лесного низового пожара повышается;

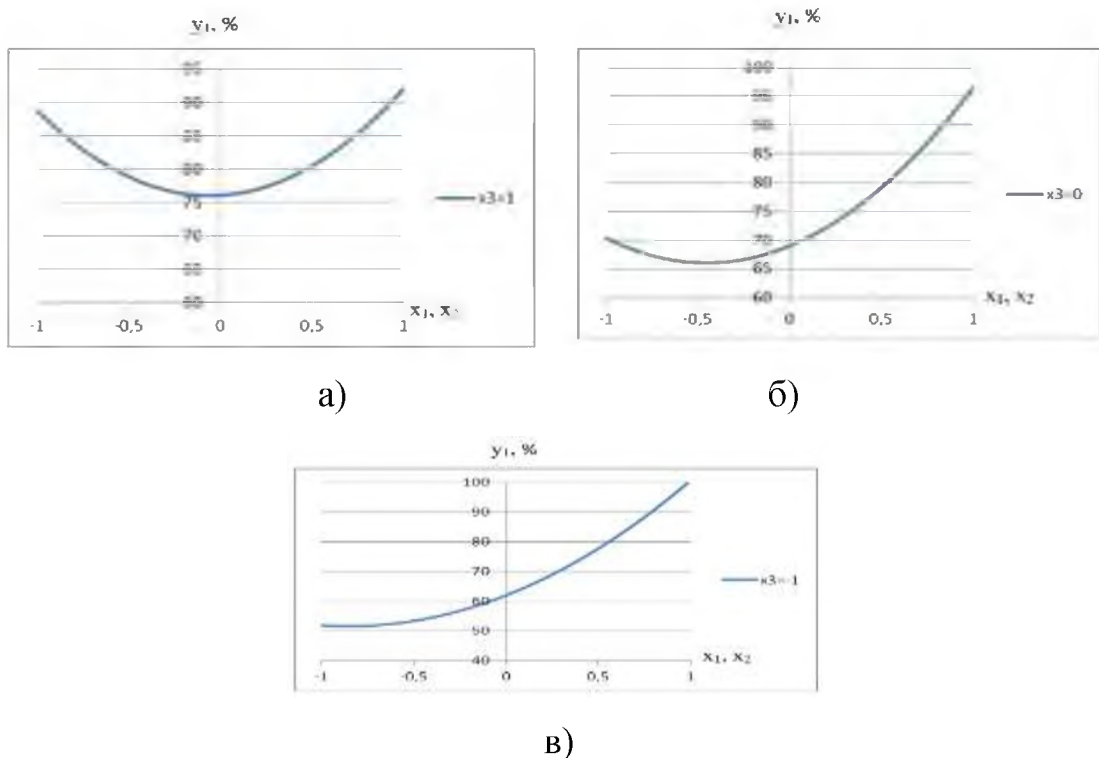


Рисунок 7.43 – Зависимость влияния парного взаимодействие угла атаки сферических дисков (x_1) и угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) при различных фиксированных значениях расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) на полноту тушения лесного низового пожара

5) существенное – парное взаимодействие угла атаки сферических дисков (x_1) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3), рассмотрим влияние парного взаимодействия угла атаки сферических дисков (x_1) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при различных фиксированных значениях угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2):

а) при больших углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости $x_2 = 1$ – с одновременным увеличением x_1 и x_3 сильно повышается полнота тушения лесного низового пожара;

б) при средних углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости $x_2 = 0$ – с одновременным увеличением x_1 и x_3 сильно повышается полнота тушения лесного низового пожара;

в) при малых углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости $x_2 = 0$ – с одновременным увеличением x_1 и x_3 значительно повышается полнота тушения лесного низового пожара;

б) несильное – парное взаимодействие угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3), рассмотрим влияние парного взаимодействия угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при различных фиксированных значениях угла атаки сферических дисков (x_1):

а) при больших углах атаки $x_1 = 1$ – с одновременным увеличением x_2 и x_3 до их средних значений полнота тушения лесного низового пожара слабо повышается, при дальнейшем одновременном увеличении x_2 и x_3 до их максимальных значений полнота тушения лесного низового пожара слабо снижается;

б) при средних углах атаки $x_1 = 0$ – с одновременным увеличением x_2 и x_3 полнота тушения лесного низового пожара незначительно снижается;

в) при малых углах атаки $x_1 = -1$ – с одновременным увеличением x_2 и x_3 полнота тушения лесного низового пожара существенно снижается;

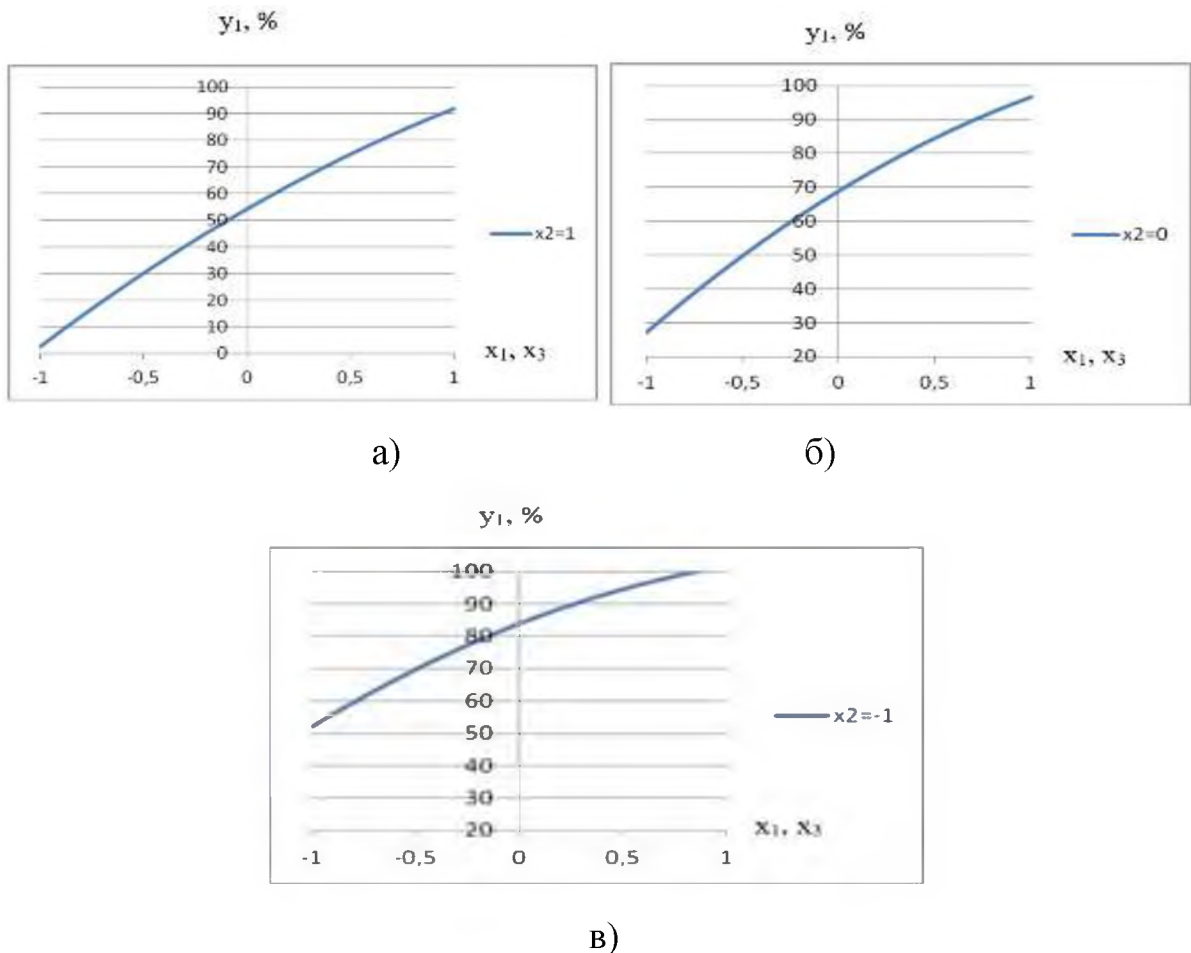


Рисунок 7.44 – Зависимость влияния парного взаимодействия угла атаки сферических дисков (x_1) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при различных фиксированных значениях угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) на полноту тушения лесного низового пожара

7) при одновременном росте всех факторов – увеличение угла атаки сферических дисков (x_1) повышает полноту тушения лесного низового пожара, при этом при больших значениях x_2 и x_3 влияние x_1 более выражено; с увеличением значений x_1 одновременный рост x_2 и x_3 менее заметно влияет на полноту тушения лесного низового пожара;

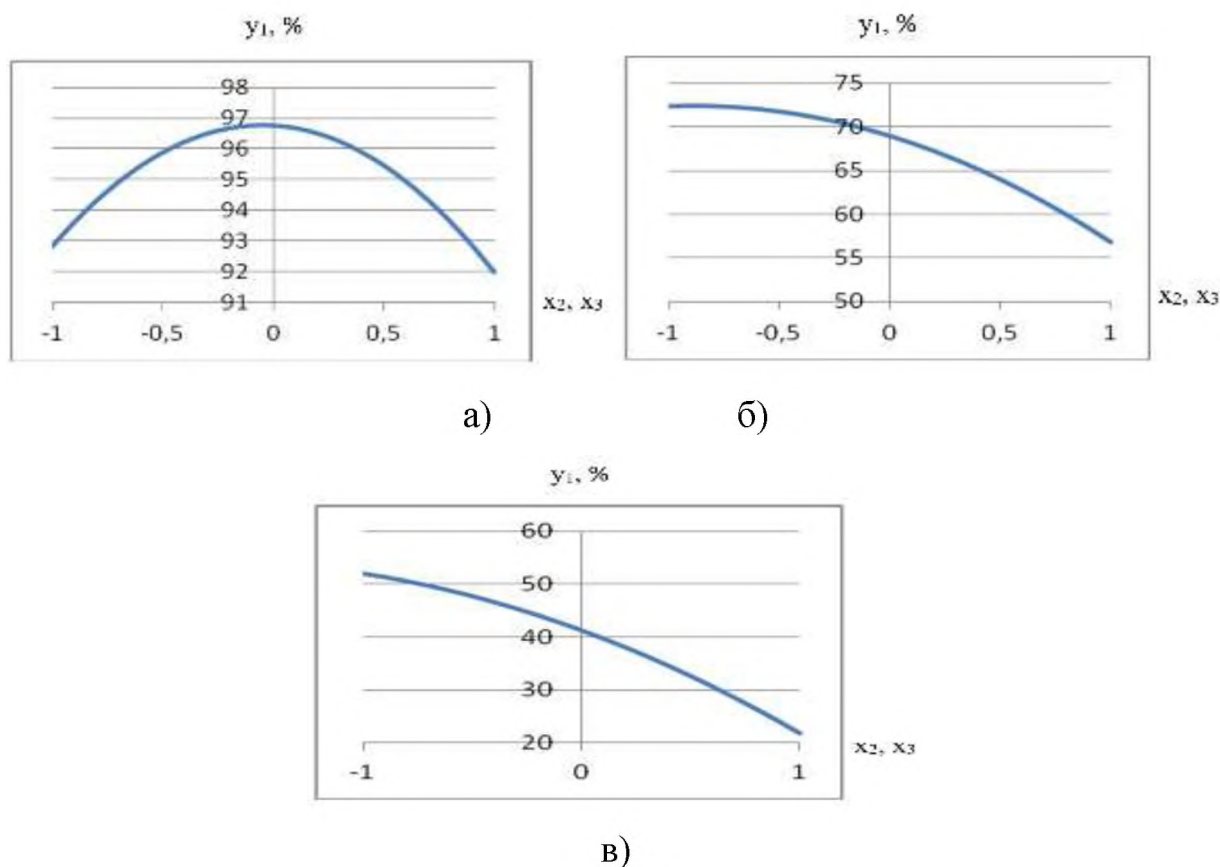


Рисунок 7.45 – Зависимость влияния парного взаимодействия угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при различных фиксированных значениях угла атаки сферических дисков (x_1) на полноту тушения лесного низового пожара

8) изменение скорости движения агрегата практически не влияет на полноту тушения лесного низового пожара.

Проведя анализ влияния факторов на полноту тушения лесного низового пожара очага горения на расстоянии 6 м по полученной модели (7.2), можно отметить:

1) значимое влияние оказывает изменение угла атаки сферических дисков (x_1), рассмотрим влияние на полноту тушения лесного низового пожара изменения x_1 при различных фиксированных значениях x_2 и x_3 :

а) при больших углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_1 очень сильно, при $x_2 = 1$ и $x_3 = 1,0,-1$ – с увеличением x_1 полнота тушения лесного низового пожара сильно увеличивается, причем чем меньше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

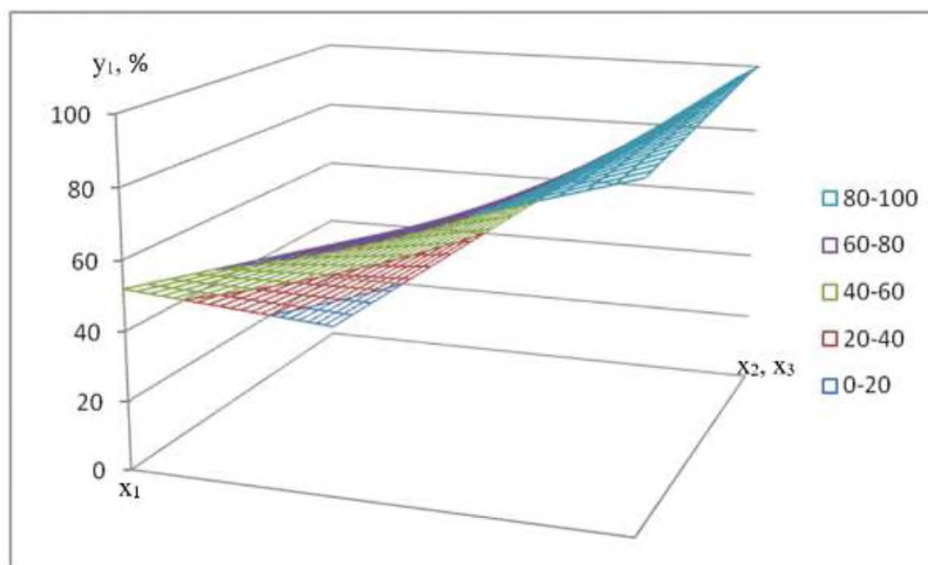
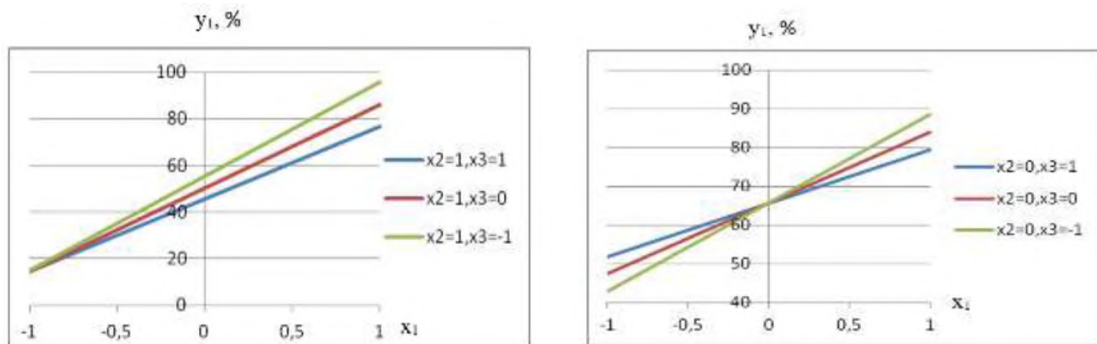


Рисунок 7.46 – Зависимость влияния угла атаки сферических дисков (x_1) и угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2), расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при одновременном росте всех факторов на полноту тушения лесного низового пожара

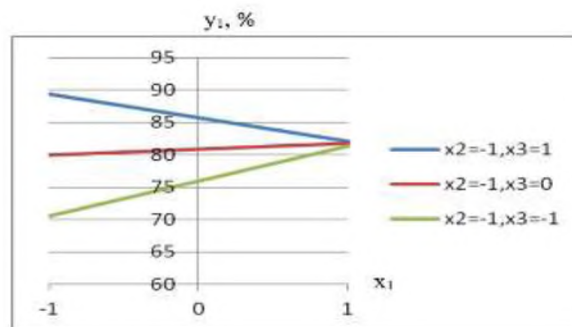
б) при средних углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_1 сильно, при $x_2 = 0$ и $x_3 = 1,0,-1$ – с увеличением x_1 полнота тушения лесного низового пожара существенно увеличивается, причем чем меньше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

в) при малых углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_1 неоднозначно, при $x_2 = 0$ и $x_3 = 0, -1$ – с увеличением x_1 полнота тушения лесного низового пожара незначительно увеличивается, причем чем меньше x_3 , тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше, при $x_3 = 1$ – с увеличением x_1 полнота тушения лесного низового пожара незначительно уменьшается;



а)

б)



в)

Рисунок 7.47 – Зависимость влияния угла атаки сферических дисков (x_1) на полноту тушения лесного низового пожара очага возгорания при различных фиксированных значениях x_2 и x_3

2) существенное – изменение угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2), рассмотрим влияние на полноту тушения лесного низового пожара изменения x_2 при различных фиксированных значениях x_1 и x_3 :

а) при больших углах атаки сферических дисков (x_1) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_2 неоднозначно, при $x_1 = 1$ и $x_3 = -1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара незначительно повышается, при $x_1 = 1$ и $x_3 = 0$ – x_2 слабо положительно влияет на полноту тушения лесного низового пожара, при $x_1 = 1$ и $x_3 = 1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара снижается;

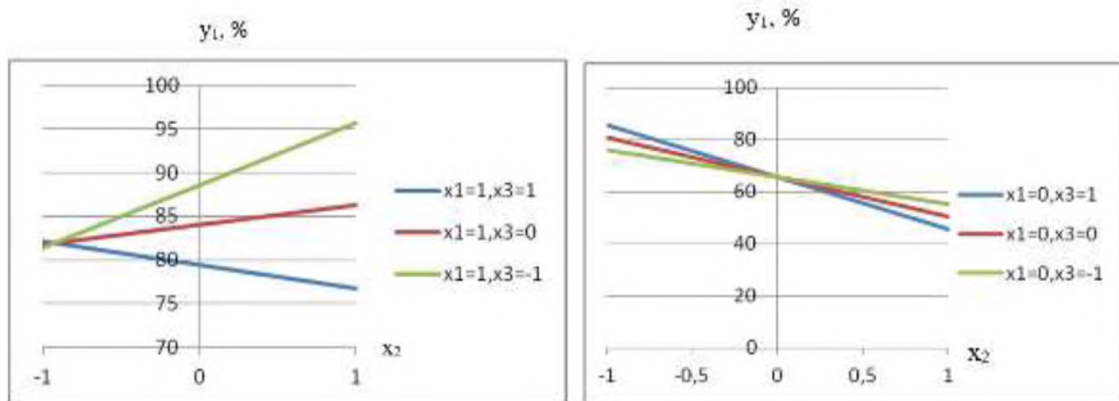
б) при средних углах атаки сферических дисков (x_1) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) влияние изменения x_2 заметно, при $x_1 = 0$ и $x_3 = 1, 0, -1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара снижается, причем чем больше x_3 тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

в) при малых углах атаки сферических дисков (x_1) и различных расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) изменения x_2 существенно, при $x_1 = -1$ и $x_3 = 1, 0, -1$ – с увеличением x_2 полнота тушения лесного низового пожара значительно снижается, причем чем больше x_3 тем влияние x_2 на полноту тушения лесного низового пожара выше;

3) существенное – парное взаимодействие угла атаки сферических дисков (x_1) и угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2), рассмотрим влияние парного взаимодействия угла атаки сферических дисков (x_1) и угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) при различных фиксированных значениях расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3):

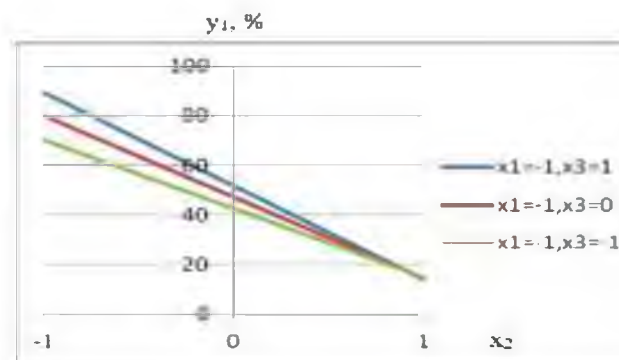
а) при больших расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов $x_3 = 1$ – с одновременным увеличением x_1 и x_2 заметно изменяется полнота тушения лесного низового пожара, с одновременным увеличением x_1 и x_2 до их средних значений полнота тушения лесного низового пожара снижается, при дальнейшем одновременном увеличении x_1 и x_2 до их максимальных значений полнота тушения лесного низового пожара повышается;

б) при средних расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов $x_3 = 0$ – с одновременным увеличением x_1 и x_2 заметно изменяется полнота тушения лесного низового пожара, с одновременным увеличением x_1 и x_2 сначала полнота тушения лесного низового пожара снижается, при дальнейшем одновременном увеличении x_1 и x_2 до их максимальных значений полнота тушения лесного низового пожара заметно повышается;



а)

б)

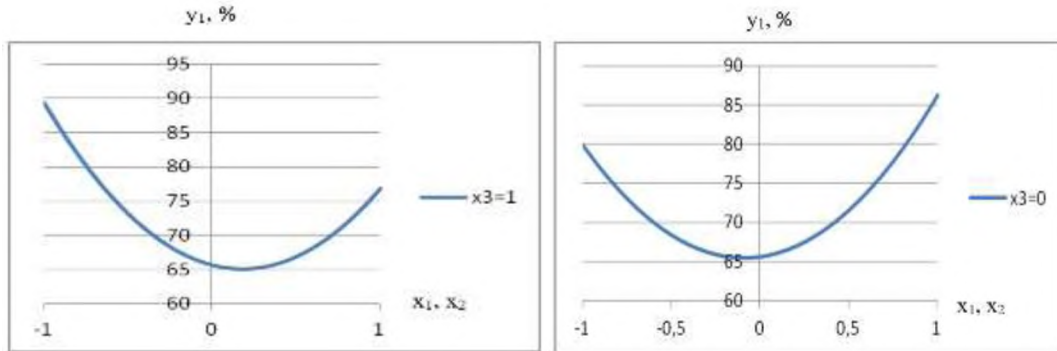


в)

Рисунок 7.48 – Зависимость влияния угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) на полноту тушения лесного низового пожара при различных фиксированных значениях x_1 и x_3

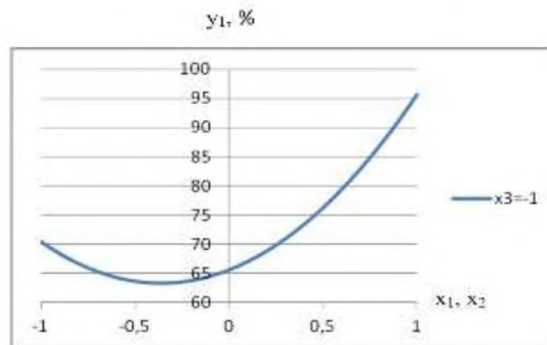
в) при малых расстояниях поперечного смещения дисковых рабочих органов $x_3 = -1$ – с одновременным увеличением x_1 и x_2 заметно изменяется полнота тушения лесного низового пожара, с одновременным увеличением x_1

и x_2 сначала полнота тушения лесного низового пожара слабо снижается, при дальнейшем одновременном увеличении x_1 и x_2 до их максимальных значений полнота тушения лесного низового пожара заметно повышается;



а)

б)



в)

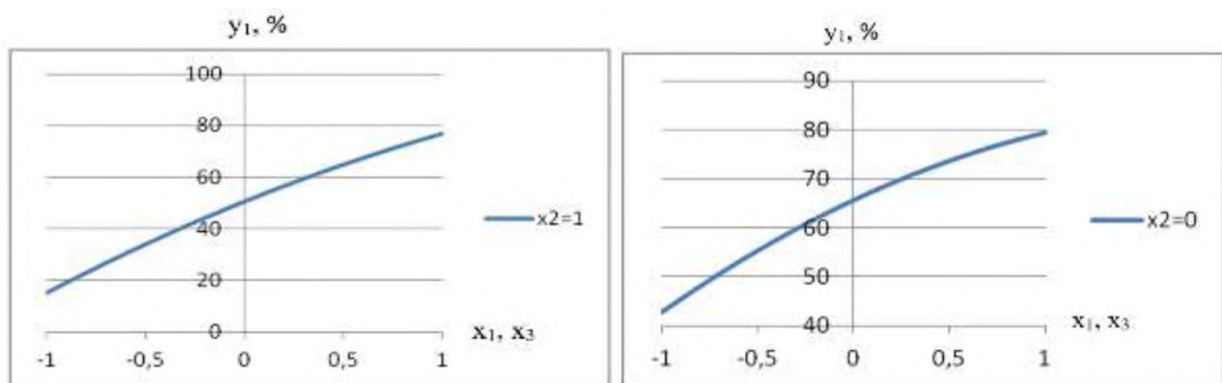
Рисунок 7.49 – Зависимость влияния парного взаимодействия угла атаки сферических дисков (x_1) и угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) при различных фиксированных значениях расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) на полноту тушения лесного низового пожара

4) существенное – парное взаимодействие угла атаки сферических дисков (x_1) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3), рассмотрим влияние парного взаимодействия угла атаки сферических дисков (x_1) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов

(x_3) при различных фиксированных значениях угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2):

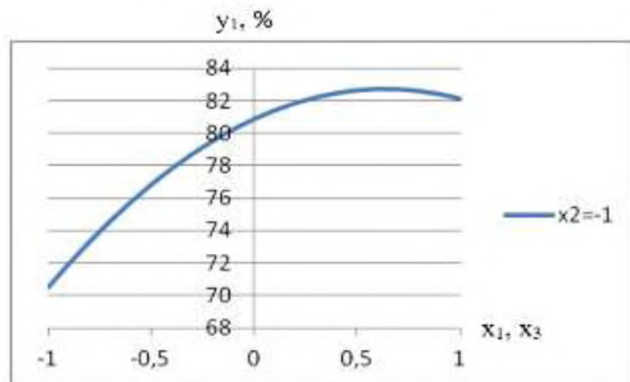
а) при больших углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости $x_2 = 1$ – с одновременным увеличением x_1 и x_3 существенно повышается полнота тушения лесного низового пожара;

б) при средних углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости $x_2 = 0$ – с одновременным увеличением x_1 и x_3 заметно повышается полнота тушения лесного низового пожара;



а)

б)



в)

Рисунок 7.50 – Зависимость влияния парного взаимодействия угла атаки сферических дисков (x_1) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при различных фиксированных значениях угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) на полноту тушения лесного низового пожара

в) при малых углах установки сферических дисков в вертикальной плоскости $x_2 = 0$ – с одновременным увеличением x_1 и x_3 в малой степени влияет на повышение полноты тушения лесного низового пожара, но при приближении к максимальным значениям x_1 и x_3 полнота тушения лесного низового пожара начинает в меньшей степени снижаться;

5) несильное – парное взаимодействие угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и расстояние поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3), рассмотрим влияние парного взаимодействия угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и расстояние поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при различных фиксированных значениях угла атаки сферических дисков (x_1):

а) при больших углах атаки $x_1 = 1$ – с одновременным увеличением x_2 и x_3 до их средних значений полнота тушения лесного низового пожара слабо повышается, при дальнейшем одновременном увеличении x_2 и x_3 до их максимальных значений, полнота тушения лесного низового пожара слабо снижается;

б) при средних углах атаки $x_1 = 0$ – с одновременным увеличением x_2 и x_3 полнота тушения лесного низового пожара заметно снижается;

в) при малых углах атаки $x_1 = -1$ – с одновременным увеличением x_2 и x_3 полнота тушения лесного низового пожара существенно снижается;

б) при одновременном росте всех факторов – увеличение угла атаки сферических дисков (x_1) повышает полноту тушения лесного низового пожара, при этом при больших значениях x_2 и x_3 влияние x_1 более выражено; с увеличением значений x_1 одновременный рост x_2 и x_3 менее заметно влияет на полноту тушения лесного низового пожара;

7) изменение расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) оказывает влияние на полноту тушения лесного низового пожара, только в парных взаимодействиях с другими факторами;

8) при увеличении скорости движения машины, снижается полнота тушения лесного низового пожара.

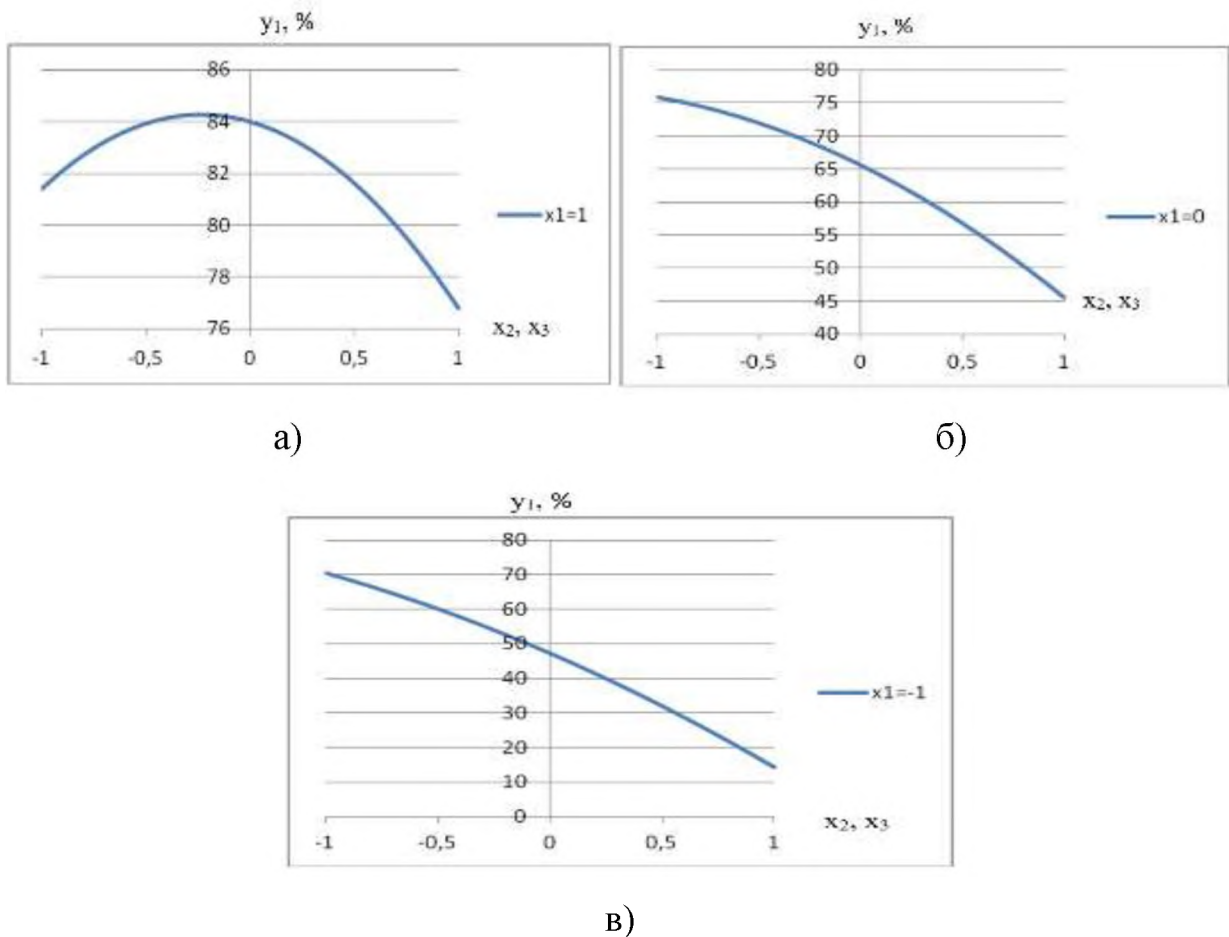


Рисунок 7.51 – Зависимость влияния парного взаимодействия угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при различных фиксированных значениях угла атаки сферических дисков (x_1) на полноту тушения лесного низового пожара

Проведем многоцелевую оптимизацию, в которой необходимо определить оптимальные значения параметров грунтометательной машины, при которых обеспечивается максимальная полнота тушения кромки лесного низового пожара в дальней зоне от машины при полном тушении в ближней зоне.

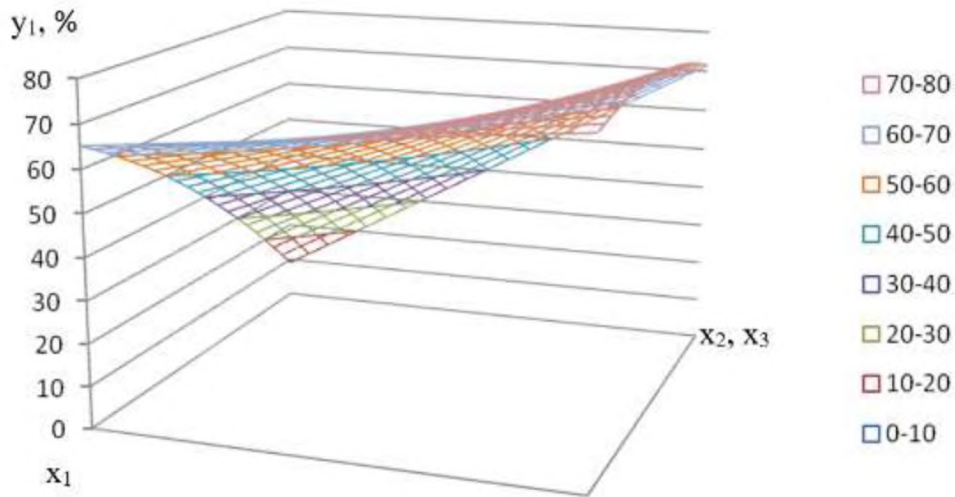


Рисунок 7.52 – Зависимость влияния угла установки сферических дисков в вертикальной плоскости (x_2) и расстояния поперечного смещения дисковых рабочих органов (x_3) при одновременном росте всех исследуемых факторов на полноту тушения лесного низового пожара

7.4. Оптимизация параметров грунтометательной машины

Поставленная задача относится к задачам нелинейного программирования с нелинейными ограничениями, будем её решать методом аддитивного свертывания критериев оптимизации [132] и сформулируем так:

$$Q = \sum_{i=1}^2 \lambda_i y_i \rightarrow \max$$

при условиях:

$$\begin{cases} y_1 = 69 + 27,78x_1 - 14,8x_2 + 7,03x_3 + 14,38x_1x_2 - 7,03x_1x_3 - 4,38x_2x_3 = 100 \\ y_2 = 60,4 + 18,35x_1 - 15,2x_2 + 17,45x_1x_2 - 4,55x_1x_3 - 4,9x_2x_3 - 5,25x_7 \leq 100 \end{cases}$$

где Q – обобщенный параметр, определим, как линейную комбинацию откликов (целевых функций y_1 и y_2) с весовыми коэффициентами соответственно λ_1 и λ_2 .

Определив по регрессионным моделям максимумы и минимумы целевых функции $y_1^+ = y_{1\max}$; $y_1^- = y_{1\min}$, $y_2^+ = y_{2\max}$, $y_2^- = y_{2\min}$, найдем коэффициенты относительного разброса (δ_i) по выражениям:

$$\delta_i = \frac{y_i^+ - y_i^-}{y_i^+} = 1 - \frac{y_i^-}{y_i^+}$$

Отсюда: $\delta_1 = 0,97$ и $\delta_2 = 0,95$.

Весовые коэффициенты определим по выражениям:

$$\lambda_i = \delta_i / \sum_{k=1}^L \delta_k, \quad \sum_{i=1}^L \lambda_i = 1$$

Тогда: $\lambda_1 \approx \lambda_2 = 0,5$.

Решим поставленную задачу оптимизации при помощи надстройки «Поиск решения» в Excel, найдем оптимальные значения факторов:

угол атаки сферических дисков (X_1) – $\alpha = 44^\circ$;

угол установки сферических дисков в вертикальной плоскости (X_2) – $\beta = 35^\circ$;

расстояние поперечного смещения дисковых рабочих органов (X_3) – $r_d = 25$ см;

скорость движения машины (X_4) – $V = 0,83$ м/с.

При этом обеспечивается полное (100 %) тушение кромки лесного низового пожара как в ближней зоне (3 м), так и в дальней зоне (6 м) от машины.

7.5. Выводы

1. Значение объёма покрытия площади грунтом, требуемым для тушения кромки лесного низового пожара, равняется около $0,06$ м³. С учётом этого, угол установки трех лопаток $\gamma = 0^\circ$, при котором наблюдается минимальное, согласно проведённой серии экспериментов, значение давления, равное $6,459$ МПа, не обеспечивает необходимый объем подаваемого в зону кромки лесного низового пожара грунта: метается лишь $0,05$ м³. Аналогичный объем

наблюдается и при использовании большего числа лопаток: четыре или шесть.

2. Требуемый объем грунта уменьшается для всех рассмотренных углов установки при использовании трех лопаток, что объясняется меньшим объемом метаемых порций каждой лопаткой при одинаковой частоте вращения фрезы-метателя. Фреза-метатель, оснащённая шестью лопатками, обеспечивает подачу необходимого для тушения кромки лесного низового пожара объёма грунта практически при любом из исследованных углов установки лопаток. Однако, как было установлено, с увеличением угла установки возрастает и величина давления рабочей жидкости в гидроприводе.

3. В отношении условия к поставленной исследовательской задаче по нахождению минимального значения давления гидравлической жидкости, оптимальным углом фиксации метательных лопаток обозначен $\gamma = -10^\circ$. Установка угла в это положение показывает, что гидравлическое давление с системе изменяется на небольшую величину от 7,634 МПа (три лопатки) до 8,387 (четыре лопатки). А показатели объема направляемого потока грунта 0,08 м³ при 3 лопатках, 0,09 м³ при четырех лопатках, 0,1 м³ при шести лопатках.

4. Однако при использовании шести лопаток на фрезе-метателе наблюдается более плавная работа гидравлического привода без резких скачков давления, тем самым снижая его средний уровень. За счёт большего числа лопаток обеспечивается постоянный контакт рабочих поверхностей фрезы-метателя с грунтом.

5. Таким образом, по результатам обработки экспериментальных данных исследования процесса метания грунта фрезой-метателем, определено, что для оснащения конструкции фрезы-метателя рационально использовать шесть лопаток. Оптимальным значением угла γ их установки является -10° .

8. Оценка технико-экономической эффективности и разработка рекомендаций по использованию результатов исследования

8.1. Определение показателей сравнительной эффективности

В процессе разработки и исследования грунтометательной техники были определены факторы, связанные с лесными низовыми пожарами, была изложена обстановка с лесными пожарами. Описан анализ причин и условий, при которых лесной пожар возникает и какие факторы необходимо исключить для остановки продвижения лесного пожара. Выполнен анализ пассивных и активных методов борьбы с лесными пожарами.

Установлены закономерности влияния физических и геометрических параметров лесного грунта на эффективность пожаротушения.

Грунтометательная техника при дополнительном оснащении органами предварительной обработки почвы и подготовки почвенного вала может работать в различных категориях лесных площадей (насаждения, вырубки, гари и т.д.), на песчаных, супесчаных почвах без каменистых включений с толщиной подстилки не более 6 см. Также выполнять весь комплекс операций по созданию минерализованных полос, при наличии в грунте отдельных включений в виде пней, валежника и др. Кроме того, грунтометательная техника обеспечивает работу в молодняках 1-го класса.

8.2. Анализ себестоимости производства продукции (эффективности технологии) по сопоставимым аналогам

Таблица 8.1 - Исходные данные для расчёта показателей экономической эффективности экспериментального образца

№	Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Базовый	Проектируемый
1	2	3	4	5	6
1	Габаритные размеры				
2	Длина	a	см		1200
3	Ширина	b	см		1227
4	Высота	h	см		1190
5	Масса	g	см		1500
6	МТА			Т-150 К	МТЗ 80/82
7	Частота вращения	ω	Об/с	480	520
8	Цена орудия	Ц_o	р	900000	1100000
9	Часова производительность	$\text{П}_ч$	пог. км/час	2	1,9
10	Время смены	$\text{T}_{\text{см}}$	час	8	8
11	Число смен	n		1	1
12	Годовая загрузка орудия	Д	дни	240	240
13	Цена трактора	$\text{Ц}_т$	р.	5100000	2815000
14	Годовая занятость трактора на всех видах работ	$t_{тт}$	час	1350	1350
15	Количество обслуживающего персонала/разряд	m	чел/разряд	2	2
16	Часова тарифная ставка 1 разряд	$\text{TС}_ч$	р.	86,81	86,81
17	Коэффициент, учитывающий надбавки и доплаты	$\text{K}_д$		1	1
18	Дополнительная зарплата	Од	%	20	20
19	Страховые взносы	Ос	%	30	30
20	Отчисление по травматизму	От	%	0,4	0,4
21	Отчисления на амортизацию по орудю	$\text{H}_{\text{ао}}$	%	14,3	14,3
22	Отчисления на амортизацию по трактору	$\text{H}_{\text{ат}}$	%	25	25
23	Отчисления на ТО и ремонт по орудю	$\text{H}_{\text{то}}$	%	23	23
24	Отчисления на ТО и ремонт по трактору	$\text{H}_{\text{тт}}$	%	39	39

Окончание таблицы 8.1

1	2	3	4	5	6
25	Комплексная цена нефтепродуктов	P	р.	58,41	58,41
26	Расход горючего на единицу выработки	q	кг	1,76	1,16
27	Нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений	E_n		0,15	0,15
28	Коэффициент, учитывающий затраты на транспортировку, монтаж, установку и наладку оборудования	K_1			1,1
29	Количество техники	N_0			1
30	Количество тракторов	N_m			1
32	Коэффициент, учитывающий затраты на смазочные материалы	K_c			1,25
33	Коэффициент, учитывающий затраты на доставку ГСМ	K_2			1,1

Определим производительность машины для тушения лесных низовых пожаров грунтом. Производительность грунтометательной машины за 1 час эксплуатационного времени определена по результатам испытаний с учетом средней производительности в час чистой работы и коэффициента использования эксплуатационного времени.

Рассчитаем сменную производительность по формуле

$$P_{см} = P_ч \cdot T_{см}, \quad (8.1)$$

где $P_ч$ – часовая производительность орудия;

$T_{см}$ – время смены, час;

$P_{см}^б = 2 \cdot 8 = 16$ пог. км/час;

$P_{см}^{np} = 1 \cdot 9 \cdot 8 = 15,2$ пог. км/час.

Рассчитаем дневную производительность по формуле

$$P_{дн} = P_{см} \cdot n, \quad (8.2)$$

где n – число смен;

$$P_{\text{дн}}^{\text{б}} = 2 \cdot 8 = 16 \text{ пог. км/дн};$$

$$P_{\text{дн}}^{\text{нр}} = 1,9 \cdot 8 = 15,2 \text{ пог. км/дн}.$$

Рассчитаем годовую производительность по формуле

$$P_{\text{год}} = P_{\text{дн}} \cdot D, \quad (8.3)$$

где D – количество дней работы орудия в году.

$$P_{\text{год}}^{\text{б}} = 16 \cdot 240 = 2840 \text{ пог. км/год};$$

$$P_{\text{год}}^{\text{нр}} = 15,2 \cdot 240 = 3648 \text{ пог. км/год}.$$

1. Определим капитальные вложения (для базовой и проектируемой модели):

Расчёт капитальных вложений по орудью

$$K_o = C_o \cdot K_1 \cdot N_o, \quad (8.4)$$

где C_o – цена орудия, р.;

N_o – количество техники;

K_1 – коэффициент, учитывающий затраты на транспортировку, монтаж, установку и наладку оборудования (для оборудования, требующего монтаж $K_1=1,2$, для остального $K_1=1,1$);

$$K_o^{\text{б}} = 900000 \cdot 1,1 \cdot 1 = 990000 \text{ р.};$$

$$K_o^{\text{нр}} = 1100000 \cdot 1,1 \cdot 1 = 1210000 \text{ р.}$$

Определение капитальных вложений по трактору

$$K_m = C_m \cdot K_1 \cdot N_m, \quad (8.5)$$

N_m – количество тракторов;

$$K_m^{\text{б}} = 5100000 \cdot 1,1 \cdot 1 = 5610000;$$

$$K_m^{\text{нр}} = 2815000 \cdot 1,1 \cdot 1 = 3096500.$$

а. Общие капитальные вложения

$$K = K_o + K_m, \quad (8.6)$$

$$K^{\sigma} = 990000 + 5610000 = 6600000 \text{ р.};$$

$$K^{np} = 1210000 + 3096500 = 4306500 \text{ р.}$$

Удельные капитальные вложения

$$K_y = \frac{K}{\Pi_{год}}, \quad (8.7)$$

$$K_y^{\sigma} \cong \frac{6600000}{3840} = 1718,75 \text{ р.};$$

$$K_y^{np} = \frac{4306500}{3648} = 1180,5 \text{ р.}$$

В качестве капитальных вложений принимаем цену на разрабатываемую машину для тушения лесных низовых пожаров грунтом, так как разрабатывается новая машина, а не модернизируется уже существующий образец.

$$\Delta K = -2293500 \text{ р.}$$

8.3. Определим текущие затраты для базовой и проектируемой модели машины для тушения лесных пожаров

Определим текущие затраты для базовой и проектируемой модели.

В состав текущих затрат включаются:

З – затраты на оплату труда обслуживающего персонала;

А – амортизационные отчисления по орудию;

Т – затраты на техническое обслуживание и ремонт орудия;

З_т – затраты на амортизацию, ТО и ремонт трактора;

Г – расходы на горюче-смазочные материалы (ГСМ);

П – прочие затраты.

Основная заработная плата обслуживающего персонала определяется по формуле

$$Z_o = \sum_i^m TC_q \cdot T_{cm} \cdot TK_i \cdot K_{\delta} \cdot N_i, \quad (8.8)$$

где TC_q – тарифная ставка рабочего первого разряда в час, р.;

TK_i – тарифный коэффициент i -того разряда;

K_o – коэффициент, учитывающий надбавки и доплаты;

N_i – количество рабочих i -того разряда, чел.;

m – общее количество рабочих, обслуживающих орудие, чел.

$$3_o^b = 8 \cdot 2 \cdot 86,81 \cdot 1 = 2777,92 \text{ р.};$$

$$3_o^{np} = 8 \cdot 2 \cdot 86,81 \cdot 1 = 2777,92 \text{ р.}$$

Дополнительная заработная плата обслуживающего персонала определяется по формуле

$$3_o = \frac{3_o \cdot O_o}{100}, \quad (8.9)$$

где O_o – отчисления на дополнительную заработную плату, %.

$$3_o^b = \frac{2777,92 \cdot 20}{100} = 555,584 \text{ р.}$$

$$3_o^{np} = \frac{2777,92 \cdot 20}{100} = 555,584 \text{ р.}$$

$$3_o^b = 555,584$$

$$3_o^{np} = 555,584$$

Отчисления на социальное страхование и по производственному травматизму определяются по формуле

$$3_c = \frac{(3_o + 3_o)(O_c + O_m)}{100}, \quad (8.10)$$

где O_c – отчисления на социальное страхование, %;

O_m – отчисления на производственный травматизм, %.

$$3_c^b = \frac{(2777,92 + 555,584) \cdot (30 + 0,4)}{100} = 1013,38522 \text{ р.}$$

$$3_c^{np} = \frac{(2777,92 + 555,584) \cdot (30 + 0,4)}{100} = 1013,38522 \text{ р.}$$

Затраты на оплату труда определяются по формуле

$$3 = 3_o + 3_o + 3_c, \quad (8.11)$$

$$3^b = 2777,92 + 555,584 + 1013,38 = 4346,88922 \text{ р.},$$

$$3^{np} = 2777,92 + 555,584 + 1013,38522 = 4346,88922 \text{ р.}$$

Затраты на оплату труда, приходящиеся на единицу выработки, определяются по формуле

$$z_y = \frac{z}{\Pi_{cm}}, \quad (8.12)$$

$$z_y^{\sigma} = \frac{4346,88922}{16} = 271,680576p.; \quad z_y^{np} = \frac{4346,88922}{15,2} = 285,979554p.$$

Амортизационные отчисления по орудью рассчитываются по формуле

$$A_o = \frac{K_o \cdot H_{ao}}{100}, \quad (8.13)$$

где H_{ao} – норма амортизации для орудия, %.

$$A_o^{\sigma} = \frac{990000 \cdot 14,3}{100} = 141570p.; \quad A_o^{np} = \frac{1210000 \cdot 14,3}{100} = 173030p.$$

Амортизационные отчисления на единицу выработки по орудью

$$A_y = \frac{A_o}{\Pi_{zod}}, \quad (8.14)$$

$$A_y^{\sigma} = 36,8671875 \quad A_y^{np} = 47,4314693$$

Затраты на техническое обслуживание и ремонт по орудью определяются по формуле

$$T_o = \frac{K_o \cdot H_{mo}}{100}, \quad (8.15)$$

где H_{mo} – отчисления на ТО и ремонт по орудью, %.

$$T_o^{\sigma} = 227700 p. \quad T_o^{np} = 278300 p.$$

Затраты по техническому обслуживанию и ремонту на единицу выработки по орудью

$$T_y = \frac{T_o}{\Pi_{zod}}, \quad (8.16)$$

$$T_y^{\sigma} = 59,296875 p. \quad T_y^{np} = 76,2883772 p.$$

Затраты на амортизацию, техническое обслуживание и ремонт по трактору на единицу выработки определяются по формуле

$$z_{my} = \frac{K_m (H_{am} + H_{mm})}{100 \cdot t_{zm} \cdot \Pi_{\mu}}, \quad (8.17)$$

где H_{am} – норма амортизации для трактора, %;

H_{mm} – отчисления на ТО и ремонт трактора, %;

t_{zm} – годовая загрузка трактора на всех видах работ, ч.

$$Z_{my}^{\bar{}} = 1329,77778 \text{ р.},$$

$$Z_{my}^{np} = 772,615984 \text{ р.}$$

Расходы на горюче-смазочные материалы в расчёте на единицу выработки определяются по формуле

$$G_y = P \cdot g \cdot K_c \cdot K_2, \quad (8.18)$$

где P – комплексная цена горюче-смазочных материалов, р.;

g – расход топлива на единицу выработки, кг;

K_c – коэффициент, учитывающий затраты на смазочные материалы;

K_2 – коэффициент, учитывающий затраты на доставку ГСМ.

$$G_y^{\bar{}} = 141,3522 \text{ р.},$$

$$G_y^{np} = 93,16395 \text{ р.}$$

Если известен расход топлива за единицу времени (за 1 час, 1 день), затраты на единицу выработки можно определить:

Прочие затраты рассчитываются в размере 5 % от суммы предыдущих затрат

$$P_y = 0,05(Z_y + A_y + T_y + Z_{my} + G_y), \quad (8.19)$$

$$P_y^{\bar{}} = 91,9487308 \text{ р.},$$

$$P_y^{np} = 63,7739667 \text{ р.}$$

Суммируя удельные расходы по вышеперечисленным статьям, определяются текущие затраты на единицу выработки по базовому и проектируемому вариантам

$$C = Z_y + A_y + T_y + Z_{my} + G_y + P_y, \quad (8.20)$$

$$C^{\bar{}} = 1930,92335 \text{ р.},$$

$$C^{np} = 1339,2533 \text{ р.}$$

Абсолютное снижение текущих затрат на единицу выработки

определяется по формуле

$$\Delta C = C^{\bar{}} - C^{np}, \quad (8.21)$$

где $C^{\bar{}}$ – удельные текущие затраты на эксплуатацию орудия по базовому варианту, р.;

C^{np} – удельные текущие затраты на эксплуатацию орудия по проектируемому варианту, р.

$$\Delta C = 591,670046$$

Относительное снижение текущих затрат (%):

$$\Delta C = \frac{C^{\bar{}} - C^{np}}{C^{\bar{}}} \cdot 100\%, \quad (8.22)$$

$$\Delta C = 30,6418195 \%$$

3. Определение основных показателей экономической эффективности

Условно-годовая экономия от снижения затрат, р.

$$\mathcal{E}_y = (C^{\bar{}} - C^{np}) \cdot \Pi_{год}^{np}, \quad (8.23)$$

где $\Pi_{год}^{np}$ – годовая производительность орудия по проектируемому варианту.

$$\mathcal{E}_y = 2158412,33$$

Рассчитаем приведённые затраты на единицу выработки (для базовой и проектируемой модели), р.

$$ПЗ = C + E_n \cdot K_y, \quad (8.24)$$

$$ПЗ^{\bar{}} = 2188,73585 \text{ р.},$$

$$ПЗ^{np} = 1516,32978 \text{ р.}$$

Экономический эффект от внедрения проектируемой модели на единицу выработки, р.

$$\Delta ПЗ = ПЗ^{\bar{}} - ПЗ^{np}, \quad (8.25)$$

где $ПЗ^{\bar{}}$ – приведённые затраты на единицу выработки по базовому варианту, р.;

$ПЗ^{np}$ – приведённые затраты на единицу выработки по проектируемому варианту, р.

$$\Delta ПЗ = 672,406066 \text{ р.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения проектируемого варианта, р.

$$\mathcal{E}_2 = (ПЗ^б - ПЗ^{np}) \cdot П_{год}^{np}, \quad (8.26)$$

$$\mathcal{E}_2 = 2452937,33 \text{ р.}$$

Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений

$$K_3 = \frac{\mathcal{E}_2}{\Delta K}, \quad (8.27)$$

$$K_3 = 1,06951704$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений

$$t = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_2}, \quad (8.28)$$

$$t = 0,93500147$$

Итоговые показатели заносятся в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 - Показатели экономической эффективности внедрения проектируемого варианта

Показатели	Единицы измерения	Варианты	
		базовый	проектируемый
1	2	3	4
Производительность орудия:			
- дневная	ед./ч	16	15,2
- сменная	ед./см.	16	15,2
- годовая	ед./год.	2840	3648
Текущие затраты, приходящиеся на единицу выработки	р.	1930,92	1339,25
Окончание таблицы 8.3			
1	2	3	4
Годовой экономический	р.	—	2452937,33

эффект			
Коэффициент экономической эффективности		—	1,069
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений	лет (мес.)	—	0,935

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ основных характеристик лесной пирологии, рассмотрены способы тушения лесных пожаров и применяемые технические решения для остановки движения кромки лесного низового пожара, приведены применяемые методы исследований взаимодействия рабочих органов с окружающей средой, выделены перспективы использования и области применимости данных для борьбы с лесными пожарами грунтом.

2. Разработана имитационная модель процессов распространения тепла и проявления лесного пожара в нижнем ярусе лесной биомассы и верхних слоях лесной почвы, а также механического и теплового взаимодействия потока грунта с элементами лесной подстилки. На основе разработанной модели получены значимые характеристики для процесса тушения лесного пожара грунтом:

- поток грунта должен составлять 30-50 кг/с, в этом случае обеспечивается высокая вероятность более 0,99 тушения кромки лесного низового пожара, и потребляемая грунтометательной машиной мощность не превышает 9,3 кВт;

- при потоке грунта 20 кг/с вероятность тушения лесного пожара составляет 0,79 при относительно низкой потребляемой грунтометательной машиной мощности 5,2 кВт. В зависимости от вида грунта может быть различной эффективность тушения лесного пожара.

Для надёжного тушения кромки лесного низового пожара и низкой мощности метания грунт должен обладать температуропроводностью $6 \dots 10 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Грунтометательная машина с базовыми настроечными параметрами эффективна при ширине фронта продвигающейся кромки лесного низового пожара не более 0,6 м, при которой обеспечивается вероятность тушения лесного пожара более 0,99. При увеличении ширины полосы грунта до 0,8 м вероятность тушения кромки лесного низового пожара снижается до 0,91.

3. Разработана имитационная модель и программа для ЭВМ, позволяющая исследовать процесс движения в воздушной среде направленного потока частиц грунта, подаваемого грунтометательной машиной. В результате компьютерного эксперимента выявлено, что исходная связность фрагмента грунта оказывает существенное влияние на характер его движения:

- в случае движения связного или не связного, но плотно собранного фрагмента грунта (коэффициент сплошности равен 1,0) оказываются высокой дальность полёта (более 15 м) и минимальным рассеяние потока по скоростям (менее 1,4 м/с) и углам (менее 8°);

- в случае движения рассыпчатого грунта с коэффициентом сплошности менее 0,6 он существенно замедляется воздушной средой, скорость достижения поверхности снижается с 11,8 для сплошного потока до менее 10,3 м/с, происходит существенное рассеяние по скоростям (более 2,8 м/с) и углам (более 17°);

- в случае, когда скорость потока будет достаточно высока для сбивания кромки лесного низового пожара, коэффициент сплошности потока не менее 0,7, скорость достижения поверхности более 11 м/с, ширина формируемой полосы грунта будет составлять менее 0,9 м, потребляемая мощность грунтометательной машины будет составлять менее 6 кВт;

- при использовании для тушения лесного пожара рассыпчатого грунта с коэффициентом сплошности 0,2...0,5 (например, для песчаной и супесчаной лесной почвы) обеспечиваются относительно низкие показатели кучности потока грунта с расстояния тушения лесного пожара 15 м: скорость достижения поверхности 8,8...10,1 м/с, ширина полосы грунта увеличивается до 0,95...1,27 м, потребляемая мощность составляет 6,0...7,6 кВт, рассеяние потока по скоростям – 2,9...3,9 м/с, рассеяние потока по углам – 19...24°.

Поэтому для достижения необходимой кучности потока необходимо приближать машину для тушения лесного низового пожара грунтом на более близкое расстояние к кромке лесного пожара (около 10...11 м).

4. Разработана математическая модель грунтометательной машины, воспроизводящая процесс работы машины для тушения и предупреждения лесных пожаров, которая позволяет определить основные параметры:

- дисковых рабочих органов: оптимальная величина заглубления дисков должна лежать в диапазоне 15...20 см; оптимальный диапазон углов атаки дисков составляет 20...25°; при меньших углах атаки диски неэффективно собирают грунт, а при больших – поток грунта направляется к грунтометательному механизму в неблагоприятном для выброса направлении;

- фрезерных рабочих органов: установлено, что теоретическая частота вращения ротора машины должна находиться в пределах 8 об/с (480 об/мин), при этом обеспечивается высокая производительность машины (47 кг/с), средняя дальность выброса грунта- 12 м, а потребляемая мощность не превышает 10 кВт на один рабочий орган.

- кожуха-направителя: установлено, что оптимальный угол установки почвопровода составляет 39-44 градуса, оптимальная высота установки почвопровода – 0,38-0,42 м. При этом средняя дальность метания грунта составит не менее 14 м, доля грунта, осаждаемого в целевой полосе шириной 0,6 м, будет не менее 30 %, производительность грунтометательной машины – не менее 40 кг/с.

5. Разработана методика и компьютерная программа для цветояркого отделения потока грунта, формируемого грунтометательной машиной, от фона на кадрах видеоряда и определения характеристик потока грунта, которые позволили определить, что:

- на начальной части траектории в угловом диапазоне 34,3...36,5° скорость частиц грунта составляет одинаковую величину равную 14 м/с, что свидетельствует о хорошей сфокусированности потока; больший разброс по скоростям наблюдается в нижней части потока, что обусловлено оседанием мелких частиц (пыли) под основным потоком грунта;

- основная масса грунта (около 60 %) оседает в полосе шириной 1,0 м (от -0,4 до 0,6 м), а из остальной массы грунта около 30 % оседают в

полосе шириной 2,0 м (от -0,8 до 1,2 м); таким образом, грунтометательная машина формирует достаточно узкую полосу, что способствует тушению кромки лесного низового пожара;

- поток грунта отклонен назад на $15,4^\circ$ от перпендикулярной траектории передвижения трактора. Грунтометательная машина формирует достаточно узкий поток грунта не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости (угловой разброс не превышает 7°).

6. Грунтометательная машина остается эффективной при углах поперечного склона от -20 до 15° . При этом обеспечивается дальность метания от 10 до 24 м, кучность осадения грунта в полосе шириной 60 см – от 32 до 42 %, производительность машины – от 36 до 42 кг/с. Отклонение угла β в отрицательном или положительном направлении до 30° приводит к снижению дальности метания грунта с 15,2 до 11...12 м, снижению показателя кучности осадения грунта в целевой полосе шириной 60 см с 41 до 36 %, снижению производительности машины с 42 до 38 кг/с.

7. Базовый образец грунтометательной машины показал, что она практически сохраняет эффективность при движении вверх или вниз по склону. Некоторое снижение показателей эффективности машины на 10...20 % при движении вверх или вниз по склону не так значительно, как при движении со значительными углами склона в поперечном направлении, при котором могут снижаться показатели эффективности на 25...75 %.

Основной причиной снижения эффективности машины на склонах является отклонение от оптимальных условий движения потока грунта внутри грунтопровода, поэтому целесообразно использовать грунтопровод с изменяемыми пространственными углами установки, выставляемыми оператором или системой управления в зависимости от появления продольных или поперечных составляющих вектора ускорения свободного падения.

8. Лабораторные и полевые исследования показали, что требуемого объема грунта для тушения кромки от 0,04 до 0,1 м³ достаточно для тушения кромки лесного низового пожара; объема 0,04 м³ для интенсивного

охлаждения нагретой поверхности недостаточно для участков, имеющих лесную подстилку, а объем более $0,06 \text{ м}^3$ увеличивает время остывания поверхности.

9. По результатам обработки экспериментальных данных исследования процесса метания грунта фрезой-метателем определено, что монтаж шести лопаток на фрезе-метателе положительно скажется на процессе тушения лесного низового пожара. Оптимальным значением угла γ их установки является угол -10° .

Рекомендации по использованию результатов работы и перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Объёма грунта для тушения кромки от $0,04$ до $0,1 \text{ м}^3$ достаточно для тушения кромки лесного низового пожара. Объёма $0,04 \text{ м}^3$ для интенсивного охлаждения нагретой поверхности недостаточно для участков, имеющих лесную подстилку, более $0,06 \text{ м}^3$ увеличивает время остывания поверхности.

По результатам наблюдений за отчётные 30 минут было выявлено, что остывание верхнего слоя происходит интенсивно, а в нижних слоях температура сначала повышается, а затем также происходит рассеивание тепловой энергии в окружающую среду.

Сравнение показателей температуры с датчика, расположенного на поверхности нагреваемой площади, позволяет сделать вывод о том, что в случае тушения кромки лесного низового пожара грунтом важное значение имеет наличие лесной подстилки и её толщина. Рассеивание тепловой энергии на поверхности зоны кромки лесного низового пожара в окружающую среду происходит менее интенсивно при наличии лесной подстилки.

Характеристики температуропроводности лесного грунта не позволяют повышать температуру в нижних почвенных слоях. Серия экспериментов показала, что наблюдается значительная разница данных с датчиков, установленных с интервалом 10 мм по глубине (например, в случае отсутствия

лесной подстилки температура поверхности при её охлаждении в течение 10 минут составляет 544,15 К, а на глубине 10 мм – 474,4 К).

Поток грунта оказывает как механическое воздействие на кромку лесного низового пожара, продвигающегося по подстилке, сбивая кромку лесного пожара, так и отбирая тепло у горящей лесной подстилки, делая температуру ниже температуры возгорания среды. Процесс механического сбивания кромки лесного низового пожара сдвинут по времени на 2...20 с относительно процесса отбора тепла, происходящего позже. Результат тушения лесного пожара, зависит от того, насколько успешной будет комбинация этих двух факторов тушения лесного пожара.

Для эффективности тушения кромки лесного низового пожара поток грунта должен составлять 30...50 кг/с, в этом случае обеспечивается высокая вероятность более 0,99 тушения кромки лесного низового пожара, и потребляемая грунтометательной машиной мощность не превышает 9,3 кВт. При потоке грунта 20 кг/с вероятность тушения лесного пожара составляет 0,79 при относительно низкой потребляемой грунтометательной машиной мощности 5,2 кВт.

В зависимости от вида грунта может быть различной эффективность тушения лесного пожара. Для надёжного тушения кромки лесного низового пожара и низкой мощности метания грунт должен обладать температуропроводностью $(6...10) \cdot 10^{-7}$ м²/с. При этом вероятность тушения кромки лесного низового пожара превышает 0,99, потребляемая грунтометательной машиной мощность не выше 9,1 кВт.

В случае движения рассыпчатого грунта с коэффициентом сплошности менее 0,6 он существенно замедляется воздушной средой, скорость достижения поверхности снижается с 11,8 для сплошного потока до менее 10,3 м/с. Происходит существенное рассеяние по скоростям (более 2,8 м/с) и углам (более 17°).

Грунтометательная машина должна обеспечивать сплошность потока не менее 0,7. В этом случае скорость потока будет достаточно высока для

сбивания кромки лесного низового пожара, более 11 м/с при достижении поверхности, ширина формируемой полосы грунта будет составлять менее 0,9 м, потребляемая мощность грунтометательной машиной будет составлять менее 6 кВт.

При использовании для тушения лесного пожара рассыпчатого грунта с коэффициентом сплошности 0,2...0,5 (например, для песчаной и супесчаной лесной почвы) обеспечиваются относительно низкие показатели кучности потока грунта с расстояния тушения лесного пожара 15 м: скорость достижения поверхности 8,8...10,1 м/с, ширина полосы грунта увеличивается до 0,95...1,27 м, потребляемая мощность составляет 6,0...7,6 кВт, рассеяние потока по скоростям составляет 2,9...3,9 м/с, рассеяние потока по углам составляет 19...24°. Поэтому для достижения необходимой кучности потока необходимо приближать грунтометательную машину на более близкое расстояние к кромке лесного пожара (около 10...11 м).

Наибольший объем грунта около 60 % попадает в зону около 1, м (от –0,4 до 0,6 м), другая часть грунта около 30 % падает в зону 2,0 м (от –0,8 до 1,2 м). Полученное количественное подтверждение показывает параметры потока по разлету частиц от основной траектории, что положительно влияет на процесс тушения кромки лесного пожара.

Траектория потока грунта имеет смещение от перпендикулярного направления, от машины искривлена на 15,4°. Техническое средство позволяет создать весьма узкий поток грунта в вертикальной и горизонтальной плоскостях, при этом показатель углового разлета составляет не более 7°.

Сравнительный анализ параметров траекторий движения потока грунта, полученных при поэтапном исследовании (моделирование и полевые эксперименты), позволяет заключить, что результаты всесторонне проведенного исследования хорошо согласуются между собой и свидетельствуют о достаточно эффективной работе грунтометательной техники. Начальная скорость частиц составляет 11,5 ... 14,0 м/с, угол выброса частиц 35 ... 38°, дальность выброса 11,0 ... 12,1 м, угол оседания частиц на

поверхность 42 ... 73°.

Профили толщины осажденного слоя грунта хорошо согласуются и свидетельствуют об адекватности модели и полевого эксперимента. Большая часть грунта – около 80 % – оседает в узкой полосе шириной около 2 м на расстоянии 11 ... 13 м от точки выброса. В интервале расстояний от 2 до 10 м наблюдается незначительное оседание грунта с формированием слоя толщиной 0,5...2,0 см.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

- Провести исследования со сравнением показателей потока грунта для различных составов грунтов, в различные периоды года.

Благодарственное слово:

Работа над диссертационным исследованием выполнена под чутким руководством моего уважаемого научного консультанта д.т.н., профессора Драпалюка Михаила Валентиновича.

Дружную и крепкую семью поддерживающую и направляющую на пути к написанию диссертационного исследования.

Следует отметить ценные советы и творческий вклад коллег по цеху, д.т.н., профессора Бартенева Ивана Михайловича, д.т.н., профессора Попикова Петра Ивановича, зав. кафедрой МЛХи ПМ, доцента, к.т.н. Дручинина Дениса Юрьевича, доцента, к.т.н Лысыча Михаила Николаевича.

Руководителей чьи открытые двери и усилия помогли не бросить на половине пути: д.э.н., профессора Морковина Светлана Сергеевна, начальника НИО Сибиряткина Ирина Валентиновна и Степанова Юлия Николаевна.

А также огромная благодарность всему коллективу Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова за помощь и поддержку в процессе работы над диссертацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 340742 М. Кл. Е 02f 3/18 В 65п 31/04 Грунтомет [Текст] / В.И. Никитин, М.С. Метальников, В.Д. Браславский, В.А. Мартыненко; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства - №1487787/29-14. – Заявл. 02.11.1970; опубл. 05.06.1972.
2. Andersen, A. N. et al. Fire frequency and biodiversity conservation in Australian tropical savannas: implications from the Kapalga fire experiment // *Austral ecology*. – 2005. – Vol. 30. – №. 2. – С. 155-167.
3. Banahan, R J 1987 Patent US4852656A (02 November 1987).
4. Barker, M.E. Predicting loads on ground engaging tillage tools using computational fluid dynamics // Digital Repository, Iowa State University. 2008. P 195
5. Bartenev, I.M. Study of efficiency of soil-thrower and fire-break maker on the basis of mathematic simulation. [Text] / I.M. Bartenev, S.V. Malyukov, M.A. Gnusov and D.S. Stupnikov // *International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET) Scopus Indexed*. – 2018. Volume:9, Issue: 4, Pages:1008-1018.
6. Bartenev, I.M., Popikov P.I., Malyukov S.V., Zimarin S.V., Sherstyukov N.A. «Firefighting soil-thrower and fire-break maker» Patent RF no. 2684940.
7. Bartenev I. M. [et al.]. Modern Designs of Forest Fires Machines for Soil Extinguishment of Fire / I. M. Bartenev, S. V. Malyukov, M. A. Gnusov [et al.] // *Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» (ISEES 2018) : International Symposium on Engineering and Earth Sciences, Grozny, 11–16 ноября 2018 года. – Grozny: Atlantis Press, 2018. – P. 48-53. – DOI 10.2991/isees-18.2018.10.*
8. Bartolomei, J. E. et al. Engineering Systems Multiple-Domain Matrix: An organizing framework for modeling large-scale complex systems // *Systems Engineering*. – 2012. – Т. 15. – №. 1. – С. 41-61.
9. Bentaher, H. [идр.]. Finite element simulation of moldboard-soil interaction // *Soil and Tillage Research*. 2013. № November (134). pp 11–16.

10. Bishop, Ch. M. Pattern recognition and machine learning / Christopher M. Bishop. – New York, NY : Springer, 2006. – XX, 738 p.
11. Brunet, J. Biodiversity in European beech forests – a review with recommendations for sustainable forest management [Text] / J. Brunet, O. Fritz, G. Richnau // Ecological Bulletins. – 2010. – № 53 – p. 77-94.
12. Castillo, M.E. Determining response times for the deployment of terrestrial resources for fighting forest fires. A case study: Mediterranean–Chile (Article) [Text] / M.E. Castillo, F. Rodriguez Y Silva // Pontificia Universidad Catolica de Chile, Facultad de Agronomia e Ingenieria Forestal – 2015. Vol. 42. P. – 97-107.
13. Chen, Y., Li B. Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths // Biosystems Engineering. 2017. (161). pp 1–13.
14. Christopherson, N. S. Mechanization of fastgrowing forest: worldwide progress [Text] / N. S. Christopherson // American Society of Agricultural Engineers meeting. – 1989. – Paper No. 89-7604, MI 49085-9659 USA.
15. Cortez, P., Morais A. J. R. A data mining approach to predict forest fires using meteorological data. – 2007.
16. Dirt throwing machine for suppressing wildfire [Electronic resource]. URL: <https://wildfiretoday.com/2011/07/04/dirt-throwing-machine/> (date of the application: 11.04.2020).
17. Dynamic response of herbaceous vegetation to gap opening in a Central European beech stand [Text] / K. Kelemen, B. Mihok, L. Galhidy, T. Standovar // Silva Fennica. – 2012. – № 46(1). – p. 53-65.
18. Español, P. Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics. // Phys. Rev. E. – 1995. – Vol. 52. – P. 1734–1742.
19. Fielke, J.M. Finite element modelling of the interaction of the cutting edge of tillage implements with soil // Journal of Agricultural Engineering Research. 1999. № 1 (74). pp 91–101

20. Flannigan, M. D. et al. Forest fires and climate change in the 21 st century // Mitigation and adaptation strategies for global change. – 2006. – vol. 11. – №. 4. – pp. 847-859.

21. Flannigan, M. D., Stocks B. J., Wotton B. M. Climate change and forest fires // Science of the total environment. – 2000. – vol. 262. – №. 3. – pp. 221-229.

22. Fridlei, R. B., Yohuson N. K. A planting machine system for forest regeneration [Text] / R. B. Fridlei, N. K. Yohuson // Transactions of the ASAE. – 1985. – V.28. №6, p. 1770-1776.

23. Gao, C. et al. A review of models of forest fire occurrence prediction in China // Ying yong sheng tai xue bao = The journal of applied ecology. – 2020. – vol. 31. – №. 9. – pp 3227-3240.

24. 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.

25. Gnusov, M. A. et al. Improving the efficiency of forest fire prevention and suppression with of forest fire machine // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – vol. 919. – №. 3. – pp 032025.

26. Gnusov, M. A. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52066. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052066.

27. Gnusov, M. A. Volumetric dynamometer units for laboratory and field testing of tillage equipment / M. A. Gnusov, M. N. Lysych, D. Yu. Druchinin // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg,

03–06 марта 2021 года. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 52047. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.

28. Gnusov M. A. [et al.] Laboratory studies of extinguishing a forest ground fire with soil / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin, S. V. Zimarin // AIP Conference Proceedings : 2, Krasnoyarsk, 29–31 июля 2021 года. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 030031. – DOI 10.1063/5.0094294.

29. Gnusov M. A. [et al.] Improving the efficiency of forest fire prevention and suppression with of forest fire machine / M. A. Gnusov, P. I. Popikov, S. V. Malyukov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32025. – DOI 10.1088/1757-899X/919/3/032025.

30. Gnusov M. A. [et al.] Electromechanical stand for the process of throwing soil with a cutter-thrower / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin, L. D. Bukhtoyarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 29–31 июля 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 1181. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12023. – DOI 10.1088/1757-899X/1181/1/012023.

31. Gnusov, M. A. [и др.]. Studies of the traction characteristics of the opener of a forestry seeder for a nursery / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2021 года. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 042048. – DOI 10.1088/1755-1315/981/4/042048.

32. Gnusov, M. A. [и др.]. Simulation modeling of the soil flow movement process in the air, supplied by a ground gun while extinguishing a forest fire / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, P. I. Popikov, D. Yu. Druchinin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 октября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 012057. – DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012057.

33. Gnusov, M. A. [и др.]. Simulation of dynamic processes when a soil-throwing drum meets an obstacle / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series : IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering 2022 (AP-ITECH-IV 2022), Bukhara, 05–08 октября 2022 года. Vol. 2388. – Bukhara: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012095. – DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012095.

34. Gnusov, M. A. [и др.]. Simulation of layout schemes of soil-throwing machine-tractor units based on articulated load-bearing machines / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, M. N. Lysych [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32023. – DOI 10.1088/1757-899X/919/3/032023.

35. Glushkov, S. [et al.] Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator / S. Glushkov, A. Rybak, P. Popikov [et al.] // Лесотехнический журнал. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – P. 88-99. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8.

36. Haddock, W. H., Hassan A. E. Testing Unit for Soil Microsite Preparation [Text] / W. H. Haddock, A. E. Hassan // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1981. – №5. p. 1141-1148.

37. Hakansson, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough lever [Text] / I. Hakansson // Soil Tillage Research. – 1990. – № 16. – p. 18 - 21.

38. Hofsten, H. Machine planting – history or present day? [Text] / H. Hofsten // Plantaktuellt. – 2003. № 2. – p. 6-7. (In Swedish).

39. Hoover, W.G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations // Physica A. – 1983. – Vol. 118. – P. 111-122.

40. Jakob, C., Konietzky H. Particle Methods. AnOverview. – Freiberg, 2012. – 24 p.

41. Korovin, G. N. Analysis of the distribution of forest fires in Russia // Fire in ecosystems of boreal Eurasia. – Springer, Dordrecht, 1996. – pp. 112-128.
42. Kozłowski, T.T. Soil Compaction and Growth of Woody Plants [Text] / T.T. Kozłowski // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1999. – № 14(6). – p. 596-619.
43. Laschi, A. et al. Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2019. – vol. 40. – №. 1. – pp 207-219.
44. Luoranen, J. Machine Planting of Norway Spruce by Bracke and Ecoplanter: An Evaluation of Soil Preparation, Planting Method and Seedling Performance [Text] / J. Luoranen, R. Rikala, H. Smolander // Silva Fennica : regular issues. – 2011. – № 45(3). – p. 341-357.
45. Nilsson U. [и др.]. Reforestation with planting in northern Europe [Text] / U. Nilsson, J. Luoranen, T. Kolstro, G. Orlander, P. Puttonen // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2010. – № 25(4). – p. 283-294.
46. Martell, D. L. Forest fire management // Handbook of operations research in natural resources. – Springer, Boston, MA, 2007. – pp 489-509.
47. Miles L. et al. A global overview of the conservation status of tropical dry forests // Journal of biogeography. – 2006. – T. 33. – №. 3. – C. 491-505.
48. Multifrequency Nuclear Magnetic Resonance as an Efficient Tool to Investigate Heterospin Complexes in Solutions / N. N. Fishman, N. N. Lukzen, K. L. Ivanov [et al.] // The Journal of Physical Chemistry A (Dynamics, Kinetics, Environmental Chemistry, Spectroscopy, Structure, Theory). – 2020. – Vol. 124, No. 7. – P. 1343-1352. – DOI 10.1021/acs.jpca.9b11104.
49. Ovsyanko, V., Petrovsky A. The computer modeling of interaction between share-moulboard surface of plough and soil // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. 2014. № 1 (59). pp 100–103.
50. Peterson, A.L. Firehawk. TM: Dual-use fire-fighting technology for the National Guard (Article) [Текст] / A.L. Peterson, P.O. Washington // Proceedings of

the 1999 55th Annual Forum of the American Helicopter Society, FORUM 55; Montreal, Que., Can – 1999. Vol. 2. P. 2292-2297.

51. Petrescu, R. V. et al. NASA satellites help us to quickly detect forest fires // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – vol. 11. – №. 1. – pp. 288-296.

52. Popikov P. I. [et al.] 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 Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 октября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 012021. – DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012021.

53. Ramalho, A. H. C. et al. Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence // Journal of environmental management. – 2021. – vol. 296. – pp 113122.

54. Rievers, B., Lämmerzahl C. High precision thermal modeling of complex systems with application to the flyby and Pioneer anomaly // Annalen der Physik. – 2011. – vol. 523. – № 6. – pp. 439-449.

55. Rowell, A., Moore P. F. Global review of forest fires. – Forests for Life Programme Unit, WWF International, 2000. – pp. 66-66.

56. Rubio, I A, Rubio J A and Rubio P A 1995 ES Patent WO1997015352A1 (23 October 1996).

57. Rudz, S. Investigation of a novel image segmentation method dedicated to forest fire applications (Article) [Текст] / S. Rudz, K. Chetehouna, A. Hafiane, H. Laurent // Vol. 24. Iss. 7, July 2013, Articlenunder 075403.

58. 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 May 2013 through 4 May 2013; Code 98956.

59. Sakr, G. E. et al. Artificial intelligence for forest fire prediction // 2010 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. – IEEE, 2010. – pp 1311-1316.
60. Son, B., Her Y., Kim J. G. A design and implementation of forest-fires surveillance system based on wireless sensor networks for South Korea mountains // International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS). – 2006. – vol. 6. – №. 9. – pp. 124-130.
61. Stocks, B. J. et al. Large forest fires in Canada, 1959–1997 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2002. – vol. 107. – №. D1. – C. FFR 5-1-FFR 5-12.
62. Tenu I. [и др.]. Impact of Agricultural Traffic and Tillage Technologies on the Properties of Soil // World's largest Science, Technology & Medicine Open Access book publisher. 2012. (10). P. 263.
63. Ucgul, M., Fielke J.M., Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage : Accounting for soil cohesion and adhesion // Biosystems Engineering. 2014. (129). pp 298–306.
64. Ucgul, M., Saunders C., Fielke J.M. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge // Biosystems Engineering. 2018. (169). pp 199–208
65. Vemuri, V. Modeling of complex systems: an introduction. – Academic Press, 2014.
66. Weatherly, E E and Willms R K 1992 Patent US5214867A (11 May 1992).
67. 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.
68. Адамов, В.Е., Вергилес Э.В. Статистика промышленности: Учеб. пос. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 326 с.

69. Александр, Халафян. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA. – М: Либроком, 2013. – 384 с.
70. Алиев, А.В. Применения метода сглаженных частиц для решения задач физической газовой динамики // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9. – № 1. – С. 40-47.
71. 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.
72. Асмоловский, М. К. и др. Лесохозяйственные машины. Практикум. – 2017.
73. Аттеков А. В. Методы оптимизации / А. В. Аттеков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин. – М.: изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2003. – 440 с.
74. Баранов, А. И. Машины и механизмы для лесного хозяйства [Текст] : учеб. / А. И. Баранов. – М. : Гослесбумиздат, 1962. – 380 с.
75. Баранов, А. И. О приводе почвенных фрез (для лесного хозяйства) [Текст] / А. И. Баранов, В. В. Цыплаков // Лесное хозяйство. – 1976. – № 5. – С. 132-135.
76. Бартенев И. М., Драпалюк М. В., Казаков В. И. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления. – 2013.
77. Бартенев И. М., Казаков В. И., Казаков И. В. Аналитические исследования рыхлительно-подрезающих лап культиватора для питомников // Лесотехнический журнал. – 2011. – №. 1. – С. 17-21.
78. Бартенев, И. М. и др. Комбинированный лесопожарный грунтомет и рекомендации по его применению // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – №. 84. – С. 174-184.
79. Бартенев, И. М. Машины и механизмы лесного и лесопаркового хозяйства [Текст] : учеб. пособие / И. М. Бартенев. – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. – 348 с.

80. Бартнев, И. М. Направления в развитии конструкций культиваторов для обработки почвы на склонах [Текст] : деп. рукопись / И. М. Бартнев, С. В. Дорохин ; И. М. Бартнев, С. В. Дорохин; Воронеж. гос. лесотехн. акад. - Воронеж, 2001. - 5 с.

81. Бартнев, И. М. Новые машины и технологии для лесовосстановления и защитного лесоразведения [Текст] / И. М. Бартнев, О. Г. Климов // Лесное хозяйство. –1990. – № 10. – С. 45.

82. Бартнев, И. М. Об эффективности предохранителей лесных почвообрабатывающих орудий [Текст] / И. М. Бартнев, В. И. Посметьев // Лесное хозяйство. – 1997. – № 3. – С. 44-46.

83. Бартнев, И. М. Система машин для лесного хозяйства и защитного лесоразведения [Текст] : доп. УМО по образованию в обл. лесн. дела в качестве учеб. пособия для студентов вузов / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк, М. Л. Шабанов. – Воронеж : ВГЛТА, 2010. – 215 с.

84. Бартнев, И. М. Энергосберегающие и природосберегающие технологии в лесном комплексе [Текст] : учеб. пособие / И. М. Бартнев. – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2014. – 107 с.

85. Бартнев, И. М., Дручинин Д. Ю., Гнусов М. А. К вопросу о тушении лесных пожаров грунтом // Лесотехнический журнал. – 2012. – №. 4. – С. 97-101.

86. Бахтина, Т.А. Бортник, А.М. Валдайский, Н.П. Чукичев, А.Н. SU 388100 A1 МПК В65G 31/04(2006.01) E02F 3/18(2006.01) Заявка: 1727609/29-14, 1971.12.21 Дата подачи заявки: 1971.12.21 Опубликовано: 1973.06.22.

87. Белов, А.А., Валадайский, Н.П., Журавлев, Н.И. и Чукичев, А.Н. Авторское свидетельство №277610 дата 11.11.1970 Заявитель Ленинградский научно-исследовательский институт лесного хозяйства.

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

89. Беляев, Д. А., Федорченко И. С. Малогабаритный переносной грунтомет // Экология. Риск. Безопасность. – 2020. – С. 332-333.

90. Бурасов, Д. М. Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров и их экологических последствий : специальность 03.00.16 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Бурасов Дмитрий Михайлович. – Томск, 2006. – 18 с.
91. Буряк, Л. В., Москальченко С. А., Иванова Г. А. Лесное пожароуправление.
92. Бухтояров, Л. Д. Оптимизация параметров комбинированной машины для тушения лесных пожаров на основе теоретических и экспериментальных исследований / Л. Д. Бухтояров, М. А. Гнусов, М. В. Шавков [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 373-382.
93. Вершинин, В. И. Обоснование конструкции дискового лесного плуга для обработки почвы на нераскорчеванных вырубках [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / В. И. Вершинин; М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Воронеж. лесотехн. ин-т. - Воронеж, 1968. - 185 с.
94. Вуколов, Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов Statistica и Excel. – М: Форум, 2010. – 464 с.
95. Гааг, С. В. Перспективные направления исследований в области повышения эффективности создания минерализованных полос и тушения лесных пожаров при помощи грунтометов // StudArctic Forum. – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет», 2016. – Т. 1. – №. 1. – С. 18-21.
96. Гнусов, М. А. Определение характеристик потока почвогрунта, формируемого лесопожарным грунтометом методами оптического распознавания и оптического измерения / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков [и др.] // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 42-63. – DOI 10.15393/j2.art.2022.6423.

97. Гнусов, М. А. Моделирование рабочего процесса вырезных сферических дисков с гидроприводом лесопожарной грунтометательной машины / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Н. А. Шерстюков // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 1(37). – С. 185-192. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/23.

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

99. Гончаров, П. Э. Повышение эффективности рабочих органов дисковых борон при обработке почвы на вырубках [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01: защищена 30.10.98 / П. Э. Гончаров ; Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 1998. – 220 с.

100. Горелик, А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. — 4-е изд. — М.: Высшая школа, 2004. — 262 с.

101. ГОСТ Р 57972-2017 Объекты противопожарного обустройства лесов. Общие требования // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. (дата обращения: 21.04.2020).

102. Григорьев, И. В. Использование транспортно-технологических средств для локализации лесных пожаров технологией вакуумного водопонижения / И. В. Григорьев, А. С. Лоренц, Д. А. Полвинен // Транспортные и транспортно-технологические системы : Материалы Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Тюмень, 21 апреля 2022 года. Том I. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 118-121.

103. Григорьев, И. В. Технологии обнаружения пожара с применением электроиндукционного метода / И. В. Григорьев, В. В. Кутузов // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXI Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 июня 2019 года. – Москва: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам граждан-

ской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2019. – С. 217-222.

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

105. Григорьева, О. И. и др. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // Машиностроение: Новые концепции и технологии. – 2020. – С. 45-49.

106. Григорьев, И. В. Сравнительный анализ противопожарных систем защиты лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева, С. А. Войнаш // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 1. – С. 45-49.

107. Гринько, О. И. Повышение эффективности тушения лесных пожаров на основе прогнозных моделей их возникновения / О. И. Гринько, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 09–10 июня 2020 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2020. – С. 242-246.

108. Гущина, В. А. Совершенствование противопожарного обустройства лесов Кузнецкого лесничества Пензенской области / В. А. Гущина, А. А. Володькин // Проблемы и мониторинг природных экосистем: сборник статей V Всероссийской научно-практ. конф. — 2018. — С. 56—59.

109. Донской, М. С. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) от 8 июля 2014 г. N 313 г. Москва" Об утверждении Правил тушения лесных пожаров" 0 Зарегистрирован в Минюсте РФ 8 августа 2014 г. Регистрационный N 33484. – 2014.

110. Драпалюк, М. В. Математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров / М. В. Драпалюк, И. М. Бартенев, М. А. Гнусов [и др.] // Политема-

тический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 232-246.

111. Драпалюк, М. В. Обоснование основных параметров комбинированного рабочего органа дискового плуга [Текст] / М. В. Драпалюк, В. Н. Коротких // Молодой ученый. – 2010. – № 8 (19). – С. 96-101.

112. Драпалюк, М. В. Обоснование основных параметров рабочих органов машины для подрезки корней сеянцев дуба в питомниках лесостепи [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01: защищена 15.12.00 / М. В. Драпалюк; Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2000. – 135 с.

113. Драпалюк, М. В. Оценка качественных и энергетических показателей работы дискового плуга [Текст] / М. В. Драпалюк, В. Н. Коротких, Р. А. Столяров // Молодой ученый. – 2010. – № 8 (19). – С. 101-104.

114. Драпалюк, М. В. Перспективные технологии выращивания посадочного материала в лесных питомниках [Текст] : [монография] / М. В. Драпалюк ; Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж : ВГУ, 2006. – 247 с.

115. Драпалюк, М. В. Силовое взаимодействие фрезерно-скалывающего рабочего органа с пнем [Текст] / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Е. В. Беликов // 70 лет кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежской государственной лесотехнической академии : межвузовский сборник научных трудов / под ред. проф. И. М. Бартенева ; ВГЛТА. – Воронеж, 2007. – С. 76-78.

116. Драпалюк, М. В. Экспериментальная оптимизация параметров фрезы-метателя лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, П. Э. Гончаров [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 100-114. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/9.

117. Драпалюк, М. В. Теоретические исследования машины для тушения лесных низовых пожаров почвогрунтом на склонах / М. В. Драпалюк, М. А. Гнусов, Д. Ю. Дручинин [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 2(54). – С. 125-129. – DOI 10.18324/2077-5415-2022-2-125-129.

118. Драпалюк, М. В. Математическая модель комбинированного грунтомета-полосопрокладывателя / М. В. Драпалюк, И. М. Бартенев, М. А. Гнусов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 4(48). – С. 97-106. – DOI 10.18324/2077-5415-2020-4-97-106.

119. Драпалюк, М. В. Повышение эффективности рабочего процесса лесопожарной грунтометательной машины с гидроприводом ротора / Драпалюк М.В., Попиков П.И., Ступников Д.С., Шаров А.В., Шерстюков Н.А. Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 1 (33). С. 147-152.

120. Дрожжин, Н. А. О формировании рационального плана проведения мероприятий противопожарной профилактики в субъекте // Современные проблемы гражданской защиты. – 2016. – №. 4 (21). – С. 7-12.

121. Дручинин, Д. Ю. Обоснование параметров рабочего органа машины для выкопки саженцев с комом почвы : специальность 05.21.01 "Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дручинин Денис Юрьевич. – Воронеж, 2012. – 16 с.

122. Дручинин, Д. Ю. Развитие исследований силового резания древесины корней саженцев лезвием рабочего органа выкопочного оборудования / Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов, Н. А. Бородин [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 1(41). – С. 111-122. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/10.

123. Дручинин, Д. Ю. Особенности противопожарного обустройства лесов в Российской Федерации / Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов, С. В. Малюков, И. В. Четверикова // Resources and Technology. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 80-96. – DOI 10.15393/j2.art.2020.5302.

124. Дуброва, Т.А. Статистические методы прогнозирования. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 133 с.

125. Еремин, Е. В. Орудие для обработки почвы под культуры на нераскорчеванных вырубках с переувлажненными почвами [Текст] / Е. В. Еремин, А. В. Воскресенский // Лесное хозяйство. – 1988. – № 1. – С. 48-49.

126. Ефимова, Н. Б. Обеспечение пожарной безопасности как фактор повышения устойчивости малолесного региона [Текст] / Н. Б. Ефимова // Проблемы и перспективы развития лесомелиораций и лесного хозяйства в Южном федеральном округе : материалы международной науч.-практ. конф., посв. 90-летию высшего лесного образования на Дону. – Новочеркасск, 2010. – С. 241 - 245.

127. Жданов, Ю. М. Профилактика и тушение пожаров в лесоаграрных ландшафтах [Текст] / Ю. М. Жданов // Проблемы и перспективы развития лесомелиораций и лесного хозяйства в Южном федеральном округе : материалы международной науч.-практ. конф., посв. 90-летию высшего лесного образования на Дону. – Новочеркасск, 2010. – С. 246-251.

128. Залесов, С. В., Залесова Е. С., Оплетаев А. С. Охрана лесов от пожаров. – 2013.

129. Зеликов, Владимир Анатольевич. Повышение эффективности почвообрабатывающих агрегатов при лесовосстановлении на вырубках : автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.21.01 / Зеликов Владимир Анатольевич; [Место защиты: Воронеж. гос. лесотехн. акад.]. - Воронеж, 2018. - 32 с.

130. Зимарин, С. В. Результаты экспериментальных исследований режимов работы лесопожарного полосопрокладывателя с гидроприводом вырезных дисковых рабочих органов / С. В. Зимарин, М. А. Гнусов, В. П. Попиков, Н. А. Шерстюков // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 1(41). – С. 155-162. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/14.

131. Зимарин, С. В. Обоснование конструкции и параметров комбинированного корпуса плуга для нераскорчеванных вырубок : специальность 05.21.01 "Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. В. Зимарин. – Воронеж, 2001. – 20 с. Измаилов, А. Ф. Численные методы оптимизации / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 304 с.

132. Комарова, А. Ф. и др. Как бороться с пожарами на природных территориях. – 2012.
133. Кривцов, А.М., Кривцова Н.В. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 254-276.
134. Кузнецов, Г. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Г. В. Кузнецов, Н. В. Барановский ; Г. В. Кузнецов, Н. В. Барановский ; Министерство образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Томский политехнический университет. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2009. – 301 с. – ISBN 978-5-7692-1067-9.
135. Кузнецов, Е.Н., Чукичев А.Н. Техника тензометрирования лесохозяйственных машин (мет.рекомендации) // Л. ЛенНИИЛХ, 1980. - 55 с.
136. Курбатский, Н. П. Охраны лесов от пожаров // Лесное хозяйство. – 1975. – №. 7-12.
137. Лесная пирология [Текст] : учебное пособие / И. П. Ушатин ; М-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2011. – 120 с.
138. Лесной кодекс Российской Федерации: Федер. закон от 04 дек. 2006 г. № 200-ФЗ (ред. от 24.04.2020) // СПС «Консультант Плюс». (дата обращения: 27.04.2020).
139. Лесопожарная грунтометательная машина Драпалюк М.В., Гончаров П.Э., Ступников Д.С., Шаров А.В. Патент на изобретение RU 2616021 С , 12.04.2017. Заявка № 2016104672 от 11.02.2016.
140. Лесопожарная комбинированная грунтометательная машина Драпалюк М.В., Бартенева И.М., Гончаров П.Э., Бухтояров Л.Д., Попиков П.И., Гнусов М.А., Дручинин Д.Ю., Марков О.Б. Патент на полезную модель RU 128887 U1, 10.06.2013. Заявка № 2013100599/03 от 09.01.2013.
141. Ли, Л. Н. Разработка методологии определения величин рисков возникновения очагов возгорания в природных ландшафтах с хвойным лесом. – 2019.

142. Логачев, В. Г., Шитикова С. И. Анализ эффективности способов и средств тушения пожаров // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании. – 2012. – С 66-71.

143. Лоренц, А. С. Перспективы использования установок водопонижения при тушении лесных пожаров / А. С. Лоренц, И. В. Григорьев // Лесоземлюководство и комплексное использование древесины : Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 10 марта 2022 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 83-87.

144. Лукашин, Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 415 с.

145. Максимов, Е. И., Темных А. А. Устройство для тушения кромки лесного пожара. – 2012. RU 121 743 Дата подачи заявки: 23.03.2012.

146. Максимов, Е. И., Федорченко, И.С., Голубев, И.В., Голубев Д.А. «Фронтальный лесопожарный грунтосмет», Patent RF no. 2400274.

147. Малюков, С. В. Истоки зарождения грунтосметательных машин [Текст] / С. В. Малюков, Д. С. Ступников // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. № 4 (26). – С. 83-96.

148. Малюков, С. В. Обоснование рабочего процесса и параметров комбинированного рабочего органа кустореза-осветлителя лесных культур // Воронеж: ВГЛТА. – 2012.

149. Малюков, С. В., Ступников Д. С., Ступников А. С. Характеристика причин и условий возникновения лесных пожаров // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 2. – №. 2. – С. 55-60.

150. Миндовский, В. А. О лесных пожарах [Текст] / В. А. Миндовский // Лесопромышленный вестник–1907. –№ 44,45.

151. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления [Текст] : учеб. для вузов / под ред. А. Б. Лурье. – Л. : Колос. Ленингр. отд-ние, 1979. – 312 с.

152. Нартов, П. С. Влияние сложного движения рабочих органов лесных дисковых орудий на характер перемещения почвенной массы [Текст] / П. С. Нартов, С. С. Литвинков // Известия Высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1967. – № 3. – С. 12-19.

153. Нартов, П. С. Лесные дисковые плуги [Текст] : обзор. информ. / П. С. Нартов, В. И. Вершинин, А. П. Нартов ; Гос. ком. СССР по лесн. хоз-ву, Центр. бюро науч.-техн. информ. – М. : ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1983. – 33 с. : ил., табл. – (Механизация и автоматизация лесн. хоз-ва; вып. 3). – Библиогр.

154. Нартов, П. С. Обоснование некоторых параметров гидропривода противопожарного полосопрокладывателя ПФ-1 [Текст] / П. С. Нартов, П. И. Попиков // Машины и орудия лесного хозяйства. – Воронеж, 1977. – С. 11-12.

155. Нартов, П. С. Проектирование и расчет лесохозяйственных машин [Текст] : учеб. / П. С. Нартов. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1980. – 192 с.

156. Нартов, П. С. Переоборудование противопожарного полосопрокладывателя ПФ-1 на гидравлический привод [Текст] / П. С. Нартов, П. И. Попиков // Лесхоз. информ. – ЦБНТИлесхоз, 1978. – № 4. – С. 18-20.

157. Нартов, П. С. Переоборудование трактора Т-80Л с полосопрокладывателем ПФ-1 на гидропривод [Текст] / П. С. Нартов, П. И. Попиков // Машины и орудия для механизации лесозаготовок: межвуз. сб. науч. тр. – Л. : ЛТА, 1978. – Вып. 7. – С. 64-66.

158. Николенко С., Кадурич А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2020. – 480 с.

159. Новиков, А. И. Совершенствование технологии получения высококачественного лесосеменного материала : специальность 05.21.01 "Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства" : автореферат диссертации на

соискание ученой степени доктора технических наук / Новиков Артур Игоревич. – Воронеж, 2021. – 32 с.

160. Новиков, А. П. Гидравлика и гидропривод : методические указания к лабораторным работам для студентов по направлениям подготовки 190600, 190700, 250400, 151000. / А. П. Новиков, И. Ю. Кондратенко, А. А. Карпов. Том Часть 2. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – 23 с.

161. Новиков, А. М. Научно-экспериментальная работа в образовательном учреждении. – 1998.

162. Орлов, А.И. Прикладная статистика. – М.: Экзамен, 2006. – 671 с.

163. Орловский, С. Н. Теоретическое и экспериментальное исследование резания лесных почв фрезерными рабочими органами [Текст] / С. Н. Орловский, А. И. Карнаухов // Вестн. КрасГАУ. – 2007. – Вып. 16. – С. 215-222.

164. Орловский, С.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование резания лесных почв фрезерными рабочими органами [Текст] / С.Н Орловский, А.И. Карнаухов // Проблемы ускоренного воспроизводства и комплексного использования лесных ресурсов Воронеж, 2006. – С. 156-163.

165. Орловский, С. Н. Повышение эффективности дискофрезерных щелевых агрегатов обоснованием параметров [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. / С. Н. Орловский. – Красноярск, 2000. – 154 с.

166. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

167. Пат. 117091 РФ, 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.

168. Пат. 144715 РФ, МПК А62С 27/00 (20006.01). Грунтомет пожарный фрезерный [Текст] / Д.В. Есков, В.В. Цыплаков, С.В. Фокин, Д.В. Цыбаев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аг-

рарный университет имени Н.И. Вавилова». – 2014115875/12. – Заявл. 22.04.2014; опубл. 27.08.2014.

169. Пат. 2610815 РФ, МПК А 62 С 27/00. Лесопожарная грунтометательная машина [Текст] / И.М. Бартнев, М.В. Драпалюк, Д.С. Ступников, Д.Ю. Дручинин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – №2015125826; заявл. 29.06.2015, опубл. 15.02.2017, Бюл. №5 – 9 с.

170. Пат. 2616 021 РФ, МПК E02F 3/18 (2006.01). Лесопожарная грунтометательная машина [Текст] / М.В. Драпалюк, П.Э. Гончаров, Д.С. Ступников, А.В. Шаров ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». – 2016104672, 11.02.2016. – Заявл. 11.02.2016; опубл. 12.04.2017.

171. Пат. №2496540 РФ, МПК А62 С 27/00. Пожарный грунтомет-полосопрокладыватель [Текст] / И.М. Бартнев, М.В. Драпалюк, М.А. Гнусов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – №2012126216/12., заявл. 22.06.12; опубл. 27.10.13, Бюл. №30 – 6 с.

172. Патент № 2758319 С1 Российская Федерация, МПК А62С 27/00, А62С 3/02, E02F 3/04. Лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель : № 2021105900 : заявл. 05.03.2021 : опубл. 28.10.2021 / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, Д. Ю. Дручинин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

173. Патент № 2761919 С1 Российская Федерация, МПК А62С 27/00, А62С 3/02, E02F 3/18. Комбинированный грунтомет-полосопрокладыватель : № 2021116715 : заявл. 07.06.2021 : опубл. 14.12.2021 / М. В. Драпалюк, М. А. Гнусов, П. Э. Гончаров [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

174. Патент № 2794575 С1 Российская Федерация, МПК А62С 3/02, А62С 27/00, E02F 5/00. Машина для борьбы с лесными низовыми пожарами

почвогрунтом : № 2022128174 : заявл. 31.10.2022 : опубл. 21.04.2023 / М. В. Драпалюк, Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

175. Перминов, В. П. и др. Совершенствование пожарных машин на базе летательных аппаратов // пожарная охрана на службе государства: 1918-2018 гг. – 2018. – С 89-127.

176. Песня, А. С. Минерализованные полосы // Техносферная безопасность: наука и практика: Материалы между. – 2015. – С. 11.

177. Пиджаков, А. Ю., Решецкий Ф. Н., Гаврилова О. В. Применение авиации МЧС России при тушении лесных пожаров // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2011. – №. 1. – С 68-71.

178. Поздняков, Е. В. Обоснование параметров и режимов работы площадкоделателя вокруг пней [Текст] : дис. ... к-та. техн. наук / Е.В. Поздняков. – М., 2015. – 178 с.

179. Полупарнев, Ю. И. Почвообрабатывающие машины [Текст] : рек. УМО по образованию в обл. лесн. дела для межвуз. использования в качестве учеб. пособия студентам, обучающимся по специальности 170400 – «Машины и оборудование лесн. комплекса» / Ю. И. Полупарнев, И. М. Бартенев, Л. Т. Свиридов. – Воронеж, 1997. – 114 с.

180. Попиков, П. И. Повышение эффективности гидрофицированных машин при лесовосстановлении на вырубках [Текст] : монография / П. И. Попиков. – Воронеж : Изд-во ВГЛТА, 2001. – 156 с.

181. Попиков, П. И. Исследование работы лесной почвообрабатывающей фрезы ФЛУ-0,8 с гидрообъемным приводом [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / П. И. Попиков; М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Воронеж. лесотехн. ин-т. – Воронеж, 1973. – 184 с.

182. Попиков, П. И. Проектирование самоходных лесных машин [Текст] : тексты лекций : для студентов специальности 170400 – Машины и механизмы лесн. комплекса лесотехн. вузов при изучении дисциплин «Проектир. самоходных лесн. машин» и «Проектир. деревообраб. Оборудования» / П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров ; М-во образования Рос. Федерации, Воронеж. гос. лесотехн. акад. – Воронеж, 2002. – 90 с.

183. 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. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/11.

184. Попиков, П. И. Теоретическое исследование кинематических и динамических характеристик шнекового рабочего органа лесопожарной грунтометательной машины / П. И. Попиков, А. К. Поздняков, В. И. Усков [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 3(43). – С. 140-151. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/12.

185. Попов, В. М. К решению обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) в термообрабатываемых изделиях из древесины / В. М. Попов, И. Ю. Кондратенко, А. П. Новиков, С. Г. Атаманов // Технологии и оборудование деревообработки в XXI веке : сборник научных трудов / Министерство образования Российской Федерации, Воронежская государственная лесотехническая академия. – Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия, 2001. – С. 43-45.

186. Попов, В. М. Теплопроводность дисперсно-наполненных полимерных материалов, подвергнутых воздействию физических полей [Текст] / В. М. Попов, А. П. Новиков // Тепловые процессы в технике. – 2009. – Т. 1, № 4. – С. 148-151.

187. Потапов, А. С. Распознавание образов и машинное восприятие. –С-Пб.: Политехника, 2007. – 548 с

188. Пронин, А. Ф. Машины для лесного хозяйства и мелиорации [Текст] : учеб. пособие / А. Ф. Пронин, Г. И. Левитский, П. М. Горнов, Т. А. Модестова. – М. : Высшая школа, 1982. – 267-268 с.

189. Прохоров, Л. Н. Технологические аспекты развития и совершенствования системы машин для комплексной механизации лесного хозяйства [Текст] / Л. Н. Прохоров, В. Ф. Зинин, И. А. Слинченкова // Лесохозяйственная информация. – 2002. – № 1. – С. 40-42.

190. Раменская, А. С. современные способы мониторинга лесных экосистем / А. С. Раменская, С. И. Дегтярева, В. Д. Дорофеева // Биоразнообразие и устойчивость естественных и искусственных растительных сообществ : Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Воронеж, 28 апреля 2022 года / Отв. редактор Ю.В. Чекменева. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 103-108. – DOI 10.34220/BSNAPC2022_103-108.

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

192. Рыбак, А. Т. Теоретические основы расчета системы управления гидравлического привода стенда для испытаний поршневых гидравлических цилиндров / А. Т. Рыбак, И. К. Цыбрий, С. В. Носачев, А. Р. Зенин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 242-249. – DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-3-242-249.

193. Рыбак, А. Т. Синхронизация в многодвигательных гидромеханических системах / А. Т. Рыбак, А. В. Ивановская, П. П. Батура, А. Ю. Пелипенко // Advanced Engineering Research. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 337-345. – DOI 10.23947/2687-1653-2021-21-4-337-345.

194. Распоряжение Правительства РФ от 20.09.2018 N 1989-р (ред. от 28.02.2019) «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» / Консультант Плюс (consultant.ru)

195. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617380 Российская Федерация. Программа для моделирования рабочего процесса лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя : № 2020616422 : заявл. 22.06.2020 : опубл. 06.07.2020 / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, В. В. Посметьев, Н. А. Шерстюков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова».

196. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617381 Российская Федерация. Программа для моделирования процесса тушения лесного пожара потоком почвогрунта : № 2020616438 : заявл. 22.06.2020 : опубл. 06.07.2020 / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, В. В. Посметьев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова».

197. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617382 Российская Федерация. Программа для моделирования движения потока почвогрунта в воздушной среде : № 2020616439 : заявл. 22.06.2020 : опубл. 06.07.2020 / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, В. В. Посметьев, А. Ф. Петков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова».

198. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617714 Российская Федерация. Программа для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтометом-полосопрокладывателем, на основе оптического распознавания : № 2022617207 : заявл. 25.04.2022 : опубл. 25.04.2022 / М. В. Драпалюк, Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов, В. В. Посметьев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Во-

ронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

199. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668756 Российская Федерация. Программа для оптического определения характеристик направленного потока почвогрунта на основе лабораторных экспериментальных исследований : № 2022668391 : заявл. 11.10.2022 : опубли. 11.10.2022 / М. В. Драпалюк, М. А. Гнусов, Д. Ю. Дручинин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

200. Свиридов, Л. Т. Машины и оборудование для борьбы с лесными пожарами [Текст] : учеб. пособие / Л. Т. Свиридов. – Воронеж, 1984. – 39 с.

201. Свиридов, Л. Т. Технологии, машины и оборудование в лесном хозяйстве [Текст] : Рек. УМО по образованию в области лесного дела для межвузов. использования в качестве учеб. пособие студентам спец. 170400 / Л. Т. Свиридов, В. И. Вершинин; под общ. ред. Л. Т. Свиридова. – Воронеж, 2002. – 312 с.

202. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. Учебное пособие. – М: Юрайт, 2015. – 496 с.

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

204. Система лесохозяйственных машин [Текст] / Г. А. Ларюхин, Н. П. Калиниченко, В. В. Чернышев [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1985. – 264 с.

205. Система лесохозяйственных машин [Текст] : учеб. пособие / И. М. Бартенев [и др.]. – М. : Агропром издат, 1990. – Р 397.

206. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст] : учебное пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев – М. : Высш. шк., 1998. – 319 с.

207. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А.

Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурыкин; Под общ. ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. — 290 с.

208. Ступников, Д. С. Классификация лесных пожаров // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – №. 2-1. – С. 119-124.

209. Ступников, Д. С. Обоснование параметров рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины : дис. – диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ступников Дмитрий Сергеевич, 2018.

210. Ступников, Д. С., Ступников А. С. Технология создания противопожарных минерализованных полос в условиях лесного массива // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. – 2019. – С. 260-263.

211. 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.

212. Ступников, Д.С. Разработка лесопожарной грунтометательной машины тушения [Текст] / Д.С. Ступников // Инновационные разработки молодых ученых Воронежской области на службу региона: сб. док. по матер. регион. конфер. студ., аспирантов и молодых ученых. – Воронеж, 2015. – С. 219-223.

213. Субратов, А. А. и др. Способ тушения торфяных, лесных пожаров при помощи авиабомб, доставляемых в зону пожара вертолетом на платформе – номер патента: RU 2201776 C2, RU 2201776 C2

214. Темных, А. А., Максимов Е. И. Устройство для тушения кромки лесного пожара. – 2014. Номер патента: RU 142698 U1 Дата регистрации: 11.02.2014

215. Типовые нормы выработки на лесокультурные работы, выполняемые в равнинных условиях [Текст]. – М., 1989. – 95 с.

216. Траск, Э. Грокаем глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2019. – 352 с.

217. Указ Президента РФ от 01.12.2016 N 642 (ред. от 15.03.2021) «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» / Консультант Плюс (consultant.ru).

218. Усеня, В. В. и др. Влияние нового унифицированного химического состава для профилактики и ликвидации лесных пожаров на рост и минеральное питание сосновых насаждений // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2014. – №. 1 (165). – С. 106-109.

219. Федеральное агентство лесного хозяйства (Рослесхоз) // СПС «Консультант Плюс». (дата обращения: 20.04.2020).

220. 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.

221. Федорченко, И.С. Результаты экспериментальных исследований грунтомета лесопожарного [Текст] / И.С. Федорченко // Вестник красноярского государственного аграрного университета. – Красноярск, 2012. – №9. – С. 162-166.

222. Федюнина, Т. В., Русинов А. В., Федюнина Е. Ю. Устройство минерализованных противопожарных полос //Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении. – 2016. – С. 315-317.

223. Флик, Э. П. Механические приводы сельскохозяйственных машин [Текст] / Э. П. Флик. – М. : Машиностроение, 1984. – 272 с.

224. Фокин, С. В. О конструктивных особенностях дисковой рубительной машины для измельчения порубочных остатков / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : Материалы VII Международной научно-практической конференции, Саратов, 17–19 марта 2020 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2020. – С. 390-393.

225. Фокин, С. В. О перспективных конструкциях грунтометов с комбинированными рабочими органами / С. В. Фокин, Ю. В. Мотова, С. К. Сариев //

Аграрный научный журнал. – 2019. – № 8. – С. 89-94. – DOI 10.28983/asj.y2019i8pp89-94.

226. Фокин, С. В Новая конструкция грунтомета фрезерного типа для тушения лесных пожаров / Д. В. Есков, С. В. Фокин, Д. В. Цыбаев [и др.] // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 5-3(10-3). – С. 113-116. – DOI 10.12737/6938.

227. Фокин, С. В., Шпортько О. Н., Мотова Ю. В. О видах минерализованных полос // Центральный научный вестник. – 2017. – Т. 2. – №. 21. – С. 31 - 32.

228. Фомин, Я. А. Распознавание образов: теория и применения. — 2-е изд. — М.: ФАЗИС, 2012. — 429 с.

229. Форсайт, Дэвид А., Понс Джин. Компьютерное зрение. Современный подход Computer Vision: A Modern Approach. — М.: Вильямс, 2004. — 928 с.

230. Хабиров, И. К. Поверхностные свойства почв как основа их устойчивости [Текст] / И. К. Хабиров, И. М. Габбасова // Вестник БГАУ. – 2001. – № 1. – С. 18-21.

231. Хиникадзе, Т. А. Моделирование гидравлической системы устройства с самоадаптацией по силовым и кинематическим параметрам на рабочем органе / Т. А. Хиникадзе, А. Т. Рыбак, П. И. Попиков // Advanced Engineering Research. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 55-61. – DOI 10.23947/2687-1653-2021-21-1-55-61.

232. Стенд для исследования процессов прекращения горения Крысов П.В., Пышный А.Р., Бурняшев А.А. Патент на изобретение RU 2458719 С1, 20.08.2012. Заявка № 2011107526/12 от 25.02.2011.

233. Четыркин, Е. Н. Статистические методы прогнозирования [Текст] / Е. Н. Четыркин. – М. : Статистика, 1975. – 200 с.

234. Чукичев Алексей Николаевич, Кодянов Юрий Михайлович, Сафроненко Иван Викторович SU 1 033 198 A2 МПК E02F 5/08(2006.01) Заявка: 3426472, 1982.04.20 Дата подачи заявки: 1982.04.20 Опубликовано: 1983.08.07.

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

236. Шавков, М. В. Обоснование параметров комбинированного сошника лесопосадочной машины : дис. – Воронежская государственная лесотехническая академия, 2013.

237. Шанин, И. И., Лысыч М. Н. Эффективные орудия и механизированные технические устройства, применяемые при профилактике и тушении лесных пожаров // Успехи современного естествознания. – 2018. – №. 12-2. – С. 403-410.

238. Белов В. А., Куличенко В. В. Стенд для исследования процессов горения и тушения пожаров. – 1990. SU 1583109 A1 Ленинградский научно-исследовательский институт лесного хозяйства Белов Валерий Александрович, Куличенко Виктор Васильевич Дата публикации 07.08.1990

239. Шапиро, В. Я. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров / В. Я. Шапиро, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 1(361). – С. 61-69. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2018.1.61.

240. Стенд для исследования процессов горения и тушения пожара Алешков М.В., Емельянов Р.А., Колбасин А.А., Баланцев С.А., Смирнов А.А., Серенков А.С., Иощенко Д.А., Анохин Е.А., Алешков А.М. Патент на полезную модель RU 158135 U1, 20.12.2015. Заявка № 2014152544/12 от 25.12.2014.

241. Щеглова, Е. Г. и др. Влияние пожаров на формирование и жизнедеятельность лесных биоценозов // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2012. – №. 4. – С. 15.

242. Щеглова, Е. Г., Нестеренко Ю. М., Шабаев В. М. Лесные пожары и их роль в формировании и развитии лесных биоценозов в пойменных лесах

степной зоны // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – №. 2 (40). – С. 8-11.

243. Щетинский, Е. А. Лесные пожары и охрана лесов [Текст] : учеб. пособие для летчиков-наблюдателей / Е. А. Щетинский; одобрено и рекомендовано к изданию Центральной базой авиационной охраны лесов «Авиалесоохрана» и ВИПКЛХ. – Пушкино, 1998. – Ч. 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения результатов научно-исследовательской работы в практическую деятельность и в учебный процесс

Ректору ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова»
д.т.н. проф. Драпалюк М.В.

СПРАВКА

об использовании материалов научных исследований
докторанта Гнусова М.А.

ООО «Воронежкомплект» подтверждает, что результаты теоретических исследований по совершенствованию технологического процесса и параметров грунтометательных машин опубликованные докторантом ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» Гнусовым М.А. в следующих трудах:

1. Определение характеристик потока почвогрунта, формируемого лесопожарным грунтометом методами оптического распознавания и оптического измерения / М. А. Гнусов, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков [и др.] // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 42-63. – DOI 10.15393/j2.art.2022.6423.
2. Экспериментальная оптимизация параметров фрезы-метателя лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, П. Э. Гончаров [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 100-114. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/9.
3. Теоретические исследования машины для тушения лесных низовых пожаров почвогрунтом на склонах / М. В. Драпалюк, М. А. Гнусов, Д. Ю. Дручинин [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 2(54). – С. 125-129. – DOI 10.18324/2077-5415-2022-2-125-129.
4. Математическая модель комбинированного грунтомета-полосопрокладывателя / М. В. Драпалюк, И. М. Бартнев, М. А. Гнусов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 4(48). – С. 97-106. – DOI 10.18324/2077-5415-2020-4-97-106.
5. Анализ исследований ротационных рабочих органов с горизонтальной осью вращения / С. В. Малюков, М. А. Гнусов, А. А. Аксенов, М. А. Малюкова // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1(2). – С. 425-429.
6. Обзор перспективных методов имитационных исследований лесных почвообрабатывающих и грунтометательных МТА / М. А. Гнусов, М. Н. Лысыч // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1(2). – С. 30-35.

Используются при модернизации и проектировании новой сельскохозяйственной и лесопожарной техники.

Директор
ООО «Воронежкомплект»



О. И. Ушаков

15.03.2023

«Утверждаю»

Руководитель СГБУ ВО

«Воронежский лесопожарный центр»

Пахомов Ю.Н.

«12.» 06. 2023 г.



АКТ

О внедрении законченной научно-исследовательской, опытно-конструкторской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова в лице руководителя научно-исследовательской, опытно-конструкторской работы, ректора ВГЛТУ, доктора технических наук, профессора Драпалюка М.В., ответственного исполнителя докторанта технических наук, руководителя лаборатории лесного машиностроения инжинирингового центра ВГЛТУ Гнусова М.А. и представитель Специализированного государственного бюджетного учреждения Воронежской области «Воронежский лесопожарный центр» в лице руководителя Пахомова Ю.Н., составили акт о том, что результаты научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы на тему «Совершенствование технологического процесса и параметров грунтометательных машин», выполненной кафедрой (лабораторией) механизации лесного хозяйства и проектирования машин и Инжиниринговым центром ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, использованы при разработке и совершенствовании лесопожарной техники.

Внедрение результатов исследования даст возможность предприятию (организации) получить следующий технико-экономический эффект: повысить качество создаваемых минерализованных полос за счёт полученных

в процессе научного исследования показаний по обоснованию технологии и разработанной конструкции лесопожарной грунтометательной машины.

Замечания и предложения о дальнейшей работе по внедрению: продолжить работы по совершенствованию технологического процесса и разработке конструкции грунтометательных машин и внедрение их в серийное производство.

Ректор ФГБОУ ВО
«ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова»
д.т.н., проф.



Драпалюк М.В.

(подпись)

Ответственный исполнитель
докторант

Гнусов М.А.

(подпись)



АКТ

О внедрении законченной научно-исследовательской, опытно-конструкторской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова в лице руководителя научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы, ректора ВГЛУ, доктора технических наук Драпалюка М.В., ответственного исполнителя в лице докторанта Гнусова М.А. и представитель инжинирингового центра ВГЛУ в лице главного инженера, кандидата технических наук Лысыча М.Н., составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской (опытно-конструкторской работы) на тему: «Совершенствование технологического процесса и параметров грунтометательных машин», выполненной кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛУ имени Г.Ф. Морозова в 2019-2022 гг. использованы при разработке и совершенствовании лесопожарной техники.

Внедрение результатов исследования дало возможность инжиниринговому центру получить следующий технико-экономический эффект: за счет использования имитационной модели рабочего процесса грунтомета удалось сократить сроки проектирования аналогичных агрегатов, содержащих фрезерно-метательный рабочий орган.

Замечания и предложения по дальнейшей работе по внедрению: продолжить работу по совершенствованию технологического процесса и разработке параметров грунтометательных машин.

Ректор ФГБОУ ВО
 «Воронежский государственный
 лесотехнический университет»
 д.т.н. профессор



Драпалюк М.В.


Исполнитель
 докторант

(подпись)

Гнусов М.А.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ИМПЕРАТОРА ПЕТРА I»

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по учебной работе
д.т.н., профессор
Н.М. Дерканосова
« 23 » 05 2023 год



А К Т

о внедрении в учебный процесс
на кафедре эксплуатации транспортных и технологических машин
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ)
результатов научно-исследовательской работы докторанта
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова» Гнусова Максима Александровича на тему «Совершенствование
технологического процесса и параметров грунтометательных машин»

Основные результаты научно-исследовательской работы Гнусова Максима Александровича, в научных публикациях «Моделирование рабочего процесса вырезных сферических дисков с гидроприводом лесопожарной грунтометательной машины», «Математическая модель взаимодействия с грунтом фрезы-метателя лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя» и «Определение характеристик потока почвогрунта, формируемого лесопожарным грунтометом методами оптического распознавания и оптического измерения», используются для подготовки студентов по следующим дисциплинам: «Основы научных исследований», «Эксплуатация машинно-тракторного парка», «Техническая

эксплуатация машин и оборудования». «Энергоресурсосберегающие технологии полевых работ».

В научных работах рассматривается методика математического создания структурно сложной почвенной среды с растительностью. Определены конструктивные и технологические параметры взаимодействия рабочих органов лесопожарного грунтомета с грунтом при помощи имитационно физико-математической модели взаимосвязи сферического диска, оснащенного режущей кромкой с полукруглыми вырезами, с почвенной средой. Физико-математическое описание процесса составлено на основе имитационной программы и математического аппарата, при помощи которых решается конкретная задача минимизации энергозатрат при максимальной дистанции выброса грунта с постоянной насыпной плотностью потока по отношению к частоте вращения фрез-метателей.

Внедрение результатов научно-исследовательской работы, изложенных в представленных научных трудах, в учебный процесс позволило повысить качество подготовки обучающихся при выполнении курсовых работ, а также выпускных квалификационных работ бакалавриата и магистратуры по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, а также дипломных проектов по специальности 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства.

Зав. кафедрой
эксплуатации транспортных
и технологических машин, д.т.н.



В.Г. Козлов

Протокол № 010122-10 от 23 мая 2023 г.



АКТ

О внедрении законченной научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Воронежского государственного лесотехнического университета в лице руководителя научно-исследовательской, опытно-конструкторской работы, ректора ВГЛТУ, доктора технических наук, профессора Драпалюка М.В., ответственного исполнителя докторанта технических наук, руководителя лаборатории лесного машиностроения инжинирингового центра ВГЛТУ Гнусова М.А. и представителя УОЛ «ВГЛТУ» в лице директора Литовченко П.В. составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «Совершенствование технологического процесса и параметров грунтометательных машин» использованы при проведении противопожарных мероприятий на площадях УОЛ ВГЛТУ», путем использования применения полученных при участии исполнителя научных данных о технологии процесса и данных опытно-конструкторских работ по совершенствованию грунтометательной техники.

Внедрение результатов исследования в виде полученных данных дало возможность предприятию получить ориентировочно следующий технико-экономический эффект: разработанная грунтометательная машина практически сохраняет эффективность при движении вверх или вниз по склону. Некоторое снижение показателей эффективности машины на 10...20 % при движении вверх или вниз по склону не так значительно, как при движении со значительными углами склона в поперечном направлении, при

могут снижаться показатели эффективности на 25...75 %. Так как основной причиной снижения эффективности машины на склонах является отклонение от оптимальных условий движения потока грунта внутри грунтопровода, целесообразно использовать грунтопровод с изменяемыми пространственными углами установки, управляемыми оператором или системой управления в зависимости от появления продольных или поперечных составляющих вектора ускорения свободного падения. Грунтометательная машина остается эффективной при углах поперечного склона от -20 до 15° . При этом обеспечивается дальность метания от 10 до 24 м, кучность осадения грунта в полосе шириной 60 см – от 32 до 42 %, производительность машины – от 36 до 42 кг/с. Отклонение угла β в отрицательном или положительном направлении до 30° приводит к снижению дальности метания грунта с 15,2 до 11...12 м, снижению показателя кучности осадения грунта в целевой полосе шириной 60 см с 41 до 36 %, снижению производительности машины с 42 до 38 кг/с.

Суммарный годовой экономический эффект от использования грунтометательной техники может составлять 2452937,33 руб.

Замечания и предложения о дальнейшей работе по внедрению: продолжить работы по совершенствованию технологического процесса и разработки конструкции грунтометательных машин и внедрение их в серийное производство.

Научный консультант,
доктор технических наук,
профессор кафедры механизации
лесного хозяйства «ВГЛТУ»



М.В. Драпалюк

Ответственный исполнитель,
докторант технических наук

М.А. Гнусов

Ректору ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет
им. Г.Ф. Морозова»
д.т.н. проф. Драпалюк М.В.

СПРАВКА

об использовании материалов научных исследований
докторанта Гнусова М.А.

ООО «Гидравлика СК» подтверждает, что результаты теоретических исследований по «Совершенствованию технологического процесса и параметров грунтометательных машин» опубликованные докторантом Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова Гнусовым М.А. в следующих трудах:

1. Результаты экспериментальных исследований режимов работы лесопожарного полосопрокладывателя с гидроприводом вырезных дисковых рабочих органов / С. В. Зимарин, М. А. Гнусов, В. П. Попиков, Н. А. Шерстюков // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 1(41). – С. 155-162. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/14.

2. Экспериментальная оптимизация параметров фрезы-метателя лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, П. Э. Гончаров [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 100-114. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/9.

3. Гнусов, М. А. Орудия с фрезерными рабочими органами для локализации и профилактики лесных низовых пожаров / М. А. Гнусов, Д. Ю. Дручинин // Молодежная наука как фактор и ресурс опережающего развития: сборник статей II Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 09 февраля 2020 года. 2020. – С. 181-186.

4. Математическая модель комбинированного грунтомета-полосопрокладывателя / М. В. Драпалюк, И. М. Бартенев, М. А. Гнусов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 4(48). – С. 97-106. – DOI 10.18324/2077-5415-2020-4-97-106.

5. Гнусов, М. А. Имитационное моделирование лесопожарного МТА в среде 3D САПР SOLIDWORKS / М. А. Гнусов, М. Н. Лысыч // Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, 15–16 октября 2020 года / Редколлегия: Е.А. Яковлева [и др.]. – Воронеж: Издательство «Знание-М», 2020. – С. 369-374. – DOI 10.38006/907345-73-7.2020.369.374.

6. Simulation of dynamic processes when a soil-throwing drum meets an obstacle / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin [et al.] // Journal of

Physics: Conference Series: IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering 2022 (APITECH-IV 2022), Bukhara, 05–08 октября 2022 года. Vol. 2388. – Bukhara: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012095. – DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012095.

7. Теоретические исследования машины для тушения лесных низовых пожаров почвогрунтом на склонах / М. В. Драпалюк, М. А. Гнусов, Д. Ю. Дручинин [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 2(54). – С. 125-129. – DOI 10.18324/2077-5415-2022-2-125-129.

8. Гнусов, М. А. Обзор перспективных методов имитационных исследований лесных почвообрабатывающих и грунтометательных МТА / М. А. Гнусов, М. Н. Лысыч // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – № 1(2). – С. 30-35.

Используются при модернизации и проектировании гидравлических элементов для дорожной, сельскохозяйственной и лесной техники.

Директор ООО «Гидравлика СК»



Н. Н. Ласкин

РЕКОМЕНДОВАНО:

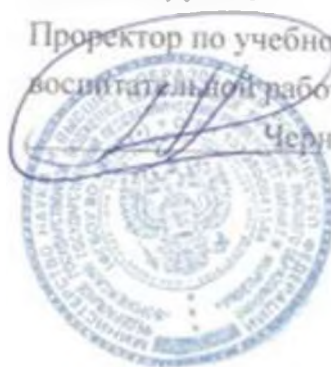
Учебно-методической комиссией
 Протокол № 3 от 20 октября 2020 г.
 Зам. председателя УМК по направлению

«Технологические машины и
 оборудование»

к.т.н., доц.  Максименков А.И.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной и
 воспитательной работе ВГУП
 Черныш А.И.



Акт

О внедрении в учебный процесс на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин программы для ЭВМ № 2020617380 «Программа для моделирования рабочего процесса лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя» по разделу «Технологические машины и оборудование», предусмотренной госбюджетной тематикой кафедры «Разработка ресурсо- и экологосберегающих технологий и обоснование типа и параметров рабочих органов машин для лесовосстановления».

1. Авторы: Гнусов М.А., Дралальюк М.В., Посметьев В.В., Шерстюков Н.А.

2. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.

Программа № 2020617380 «Программа для моделирования рабочего процесса лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя» позволяет смоделировать рабочий процесс машины и исследовать влияние его параметров на эффективность метания почвогрунта и формирование минерализованных полос при предотвращении и ликвидации лесных наземных пожаров.

3. Внедрение по дисциплинам: «Моделирование при проектировании машин и оборудования лесного комплекса».

4. Влияние на качество подготовки бакалавров: внедряемые результаты повышают уровень учебного процесса и качество подготовки бакалавров

Зав. кафедрой МЛХ и ПМ,
 к.т.н., доцент

Дручинин Д.Ю.

РЕКОМЕНДОВАНО:

Учебно-методической комиссией

Протокол № 4 от 25 ноября 2021 г.

Зам. председателя УМК по направлению

«Технологические машины и
оборудование»

д.т.н., проф.



Попиков П.И.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной и

воспитательной работе ВГЛТУ

Черных А.С.



Акт

О внедрении в учебный процесс на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин патента на изобретение № 2758319 «Лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель» по разделу «Технологические машины и оборудование», предусмотренного госбюджетной тематикой кафедры «Разработка ресурсо- и экологосберегающих технологий и обоснование типа и параметров рабочих органов машин для лесовосстановления».

1. Авторы: Игусов М.А., Драпалюк М.В., Дручинин Д.Ю.

2. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат

Патент № 2758319 «Лесопожарный грунтомет-полосопрокладыватель» позволяет расширить знания обучающихся в области технологических процессов, машин и оборудования по ликвидации и тушению лесного низового пожара почвогрунтом.

3. Внедрение по дисциплинам: «Теория и конструкция технологических машин и оборудования лесного хозяйства».

4. Влияние на качество подготовки бакалавров: внедряемые результаты повышают уровень учебного процесса и качество подготовки бакалавров.

Зав. кафедрой МЛХ и ПМ,

к.т.н., доцент



Дручинин Д.Ю.



Федеральное агентство лесного хозяйства
(Рослесхоз)

Федеральное бюджетное учреждение
– Всероссийский
научно-исследовательский институт
лесоводства и механизации
лесного хозяйства»
(ФБУ ВНИИЛМ)

141202, Московская обл., г. Пушкино,
ул. Институтская, д.15
тел. 993-30-54; факс: 993-41-91
e-mail: info@vniilm.ru
сайт: www.vniilm.ru

Ректору
Воронежского Государственного
Лесотехнического университета
им. Г.Ф. Морозова
доктору техн. наук, проф
Драпалюку М.В.

от 11.06.2024 № 609
на _____ от _____

СПРАВКА

**о висдрении результатов научных исследований докторанта
Воронежского государственного лесотехнического университета
имени Г.Ф. Морозова, Гнусова Максима Александровича**

В процессе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ) по теме: «Совершенствование системы машин для лесовосстановления, охраны и защиты лесов с учетом инновационной модернизации средств механизации для различных лесорастительных условий» используются результаты, полученные докторантом технических наук Гнусовым М. А. при проведении исследований по теме «Совершенствование технологического процесса и параметров грунтометалельных машин» и опубликованные в следующих работах:

1. Гнусов М. А. Механизация посадки сеянцев хвойных пород с ЗКС при проведении лесовосстановительных работ / М. А. Гнусов, Д. Ю. Дручинин, Н. Ю. Юрьев // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 25–26 ноября 2021 года / Отв. редактор И. В. Четверикова. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2021. – С. 11-15. – DOI 10.34220/MRTTMFC2021_11-15.

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

3. Дручинин Д. Ю., Попов М. А., Гнусов М. А. Исследование рабочих процессов лесных почвообрабатывающих машин в почвенном канале. В сборнике: Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы XX Международной научно-технической конференции. Ответственный редактор Е. А. Иванишева. Вологда, 2022. С. 241-245.

4. Дручинин Д. Ю., Гнусов М. А., Поздняков Е. В., Матюков С. В., Бухтояров Л. Д. Концепция агрегата для повышения эффективности осветления лесных культур, созданных коридорным методом. Леса России и хозяйство в них. 2022. № 2 (81). С. 27-35.

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

6. Gnusov M. A. Theoretical study of forest fire extinguishing machine use / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, D. Yu. Druchinin // IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations Vol. 1515. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52066. – DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052066.

7. Gnusov M. A. Simulation of layout schemes of soil-throwing machine-tractor units based on articulated load-bearing machines / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, M. N. Lysych [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32023. – DOI 10.1088/1757-899X/919/3/032023.

8. Gnusov M. A. Improving the efficiency of forest fire prevention and suppression with of forest fire machine / M. A. Gnusov, P. I. Popikov, S. V. Malyukov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations Vol. 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32025. – DOI 10.1088/1757-899X/919/3/032025.

9. Gnusov M. A. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering. Rostov-on-Don, 2020. – P. 012021. – DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012021.

10. Gnusov M. A. Simulation modeling of the soil flow movement process in the air, supplied by a ground gun while extinguishing a forest fire / M. A. Gnusov, M. V. Drapalyuk, P. I. Popikov, D. Yu. Druchinin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Rostov-on-Don, 2020. – P. 012057. – DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012057.

11. Gnusov, M. A. Volumetric dynamometer units for laboratory and field testing of tillage equipment / M. A. Gnusov, M. N. Lysych, D. Yu. Druchinin // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg, Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 52047. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.

Директор ФБУ ВНИИЛМ
д-р с.-х. наук, Заслуженный лесовод РФ,
академик РАН

Ведущий научный сотрудник
ФБУ ВНИИЛМ, д-р техн. наук


А. А. Мартынов

И. В. Казаков

