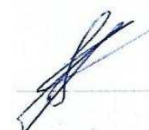


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И. Т. ТРУБИЛИНА»

На правах рукописи



НИКОЛЕНКО Александр Юрьевич

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО
СРЕДСТВА ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОЧВЫ ПОД ЗЕРНОВЫЕ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Тарасенко Борис Федорович

Краснодар – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЗАЦИИ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЗЕРНОВЫХ	10
1.1 Обзор способов основной обработки почвы	10
1.2 Анализ существующих средств механизации для обработки почвы	17
1.3 Обзор научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ...	30
1.4 Выводы. Цель и задачи исследования.....	41
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИМ СРЕДСТВОМ.....	43
2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего средства.....	43
2.2 Получение аналитической зависимости тягового сопротивления многофункционального средства	46
2.3 Моделирование силовых параметров многофункционального почвообрабатывающего средства в САПР	85
2.4 Выводы по главе.....	89
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ	90
3.1 Программа экспериментальных исследований и описание экспериментальной установки	90
3.2 Методика экспериментального исследования и применяемые приборы	94
3.3 Оптимизация параметров и режимов многофункционального средства при обработке почвы	103
3.4 Сравнение результатов испытаний многофункционального средства и теоретических исследований	116

3.5 Выводы по главе.....	118
4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	119
4.1 Оценка экономической эффективности от внедрения предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства	119
4.2 Выводы по главе.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Обработка почвы важный этап любой технологии возделывания сельскохозяйственных культур. Данный процесс, несмотря на многолетние исследования, до сих пор остается не до конца изученным. Процесс почвообработки можно охарактеризовать как высокочувствительный, на него приходится в среднем до 35 % всех энергетических затрат. Полностью исключить процесс обработки почвы из технологии возделывания зерновых не представляется возможным. Исследования, проведенные ранее, показали, что имеются существенные недостатки у комбинированных средств для основной обработки почвы.

Низкая функциональность существующих средств не позволяет использовать все плюсы разных технологий обработки почвы. При работе по отвальной технологии при обороте пласта открывается незащищенный слой почвы, который подвержен ветровой эрозии, а нижний слой почвы переуплотняется из-за давления на него трактора. Тем самым формируя плужную подошву, которая задерживает влагу, снижая плодородность до 27 %.

Безотвальное рыхление приводит к сохранению сорной растительности и образованию поверхностной корки.

Исследования И. Б. Борисенко и А. Е. Доценко показали, что переход на чизельные рабочие органы сокращает тяговое сопротивление в среднем до 45 %, при сохранении качества обработки почвы.

Неэффективный способ движения по полю приводит к увеличению времени, затрачиваемого на холостые ходы, так как существующие комбинированные средства не имеют возможности работать в режиме гладкой вспашки. Работа почвообрабатывающих машин только всвал-развал приводит к низкой энергоэффективности и со временем к ухудшению качества обработки почвы.

Следовательно, разработка многофункционального почвообрабатывающего средства, сочетающего возможность отвальной и безотвальной обработки почвы с возможностью работы в режиме гладкой вспашки, является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом 2021–2025 гг. научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (№ госрегистрации 121032300060–2).

Степень разработанности темы. Основоположниками исследования процесса основной обработки почвы были: В. П. Горячкин, Б. И. Тарасенко, Г. Н. Синеоков, Л. В. Гячев и другие ученые.

Разработкой новых рабочих органов и средств для основной обработки почвы и исследованием существующих конструкций занимались: И. В. Божко, В. М. Бойков, Е. В. Бойкова, И. Б. Борисенко, А. Е. Доценко, С. И. Камбулов, В. И. Ветохин, А. Ю. Несмиян, А. С. Путрин, И. В. Соболевский, Б. Ф. Тарасенко, В. В. Труфанов, М. В. Мезникова и другие исследователи.

Большой вклад в исследования по механизации основной обработки почвы внесли ученые Аграрного научного центра «Донской» (г. Зерноград), Азово-Черноморского инженерного института – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» (г. Зерноград) и ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (г. Краснодар).

Несмотря на глубину и обширность исследований процесса почвообработки и средств для ее выполнения, задача снижения энергозатрат является актуальной.

Рабочая гипотеза. Снижение затрат энергии и повышение качества обработки почвы под зерновые культуры можно обеспечить обоснованием параметров и режимов работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом.

Цель работы – обоснование параметров и режимов работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом, обеспечит снижение затрат энергии и повышение качества обработки почвы для зерновых культур.

Объект исследования. Технологический процесс основной обработки почвы

и многофункциональное почвообрабатывающее средство с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой.

Предмет исследования. Закономерности, связывающие параметры рабочих органов многофункционального почвообрабатывающего средства с показателями удельного тягового сопротивления и качеством обработки почвы.

Задачи исследования.

1. Разработать конструктивно-технологическую схему многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой для основной обработки почвы под зерновые культуры.

2. Получить аналитические зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режима работы.

3. Экспериментальным путем определить оптимальные параметры и режимы работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой по критерию удельного тягового сопротивления.

4. Выполнить оценку сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований.

5. Выполнить расчеты экономической эффективности предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились с учетом основных положений высшей математики, теоретической механики и сопротивления материалов. При проведении теоретических исследований применялись программы: SolidWorks, Mathcad Prime, Microsoft Excel. При проведении экспериментальных исследований применялись методы планирования многофакторного эксперимента. Обработка полученных данных осуществлена с использованием методов математической статистики.

Научная новизна работы:

– аналитические зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режимов работы;

– уравнение регрессии, позволяющее определить оптимальные параметры предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства.

Теоретическую и практическую значимость работы представляют:

– аналитические зависимости тягового сопротивления рабочих органов многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режимов работы, позволяющие обосновать основные параметры и режим работы многофункционального средства;

– регрессионные зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от геометрических параметров и режимов работы, позволяющие определить оптимальные параметры и режим работы;

– конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой, которая позволяет разработать техническое решение конструкции почвообрабатывающего средства, сочетающего процессы отвальной и безотвальной основной обработки почвы в режиме челночного движения;

– соотношение между параметрами и режимами работы многофункционального почвообрабатывающего средства, минимизирующее тяговое сопротивление и повышающее качество обработки почвы.

Новизна технических решений подтверждена двумя патентами РФ на полезные модели № 225628 и № 229905.

Реализация результатов исследований.

Опытный образец многофункционального почвообрабатывающего средства прошел производственные испытания в РПЗ «Красноармейский» – филиал ФГБНУ «ФНЦ риса» (Краснодарский край, поселок Октябрьский). Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ.

Степень достоверности и апробации работы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: результаты получены с использованием известных и хорошо зарекомендовавших методик исследования, современной измерительной и вычислительной техники; теория согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации

А. Е. Доценко и В. М. Бойкова и использованы современные методы статистической обработки экспериментальных данных с использованием программ MathCad и Microsoft Excel.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных конференциях ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ в 2022–2025 гг., а также на конференциях различного уровня: IV Международной научной конференции «Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России» (г. Красноярск, 2024 г.); II Международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение и энергоэффективность: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Нальчик, 2023 г.); Международной научной конференции «Современные тенденции энергосбережения в АПК» (г. Москва, 2024 г.); XXIII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике» (г. Кемерово, 2024 г.); Международная конференция «GEOTECH-2025», (г. Навои, 2025 г.); XX Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 2025 г.).

Положения, выносимые на защиту.

1. Конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой для основной обработки почвы под зерновые культуры.

2. Аналитические зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режимов работы.

3. Уравнение регрессии, позволяющее определить оптимальные параметры предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства.

4. Результаты оценки сходимости теоретических и экспериментальных исследований.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 30 научных работ, из них: 4 – в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК РФ; 2 – в международной базе данных *Scopus*; 18 – в статьях, опубликованных по результатам участия в конференциях; 1 патент РФ на изобретение; 4 патента на по-

лезные модели; 1 монография. Общий объем публикаций составляет 17,2 печатных листа, из них личный вклад автора 8,1 печатный лист.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Диссертация содержит 176 страниц, включая 82 рисунка, 14 таблиц, 5 приложений. Список литературы содержит 121 наименование.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЗАЦИИ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЗЕРНОВЫХ

1.1 Обзор способов основной обработки почвы

Обработка почвы направлена на улучшение условий для роста и развития сельскохозяйственных культур. Обработанная почва улучшает аэрацию и водопроницаемость не только в пахотном слое, но и значительно глубже. Этот эффект позволяет улучшить физико-механические свойства почвы и компенсирует негативное воздействие ветровой и водной эрозии плодородного слоя почвы. Вспашка уничтожает сорную растительность, тем самым очищая поле от растений-паразитов и улучшая питание сельскохозяйственных культур [85].

Основная обработка должна применяться в условиях достаточного и избыточного увлажнения, дифференцировано с безотвальной обработкой, а в условиях засушливого земледелия избирательно на заправке навоза и минеральных удобрений. Вспашка производится на лесостепных, лесолуговых, степных типах почв, не подверженных эрозии, и на почвах, сильно засорённых предшественниками, на полях с уклоном не более 8 градусов и высотой стерни не выше 25 см, на почвах с различными физико-механическими свойствами, твердостью до 4 МПа и удельным сопротивлением от 410 МПа, влажностью 1070 % от полной полевой влагоемкости до 28 % абсолютной влажности [40, 44].

Оценка качества основной обработки почвы происходит по множеству критериев. При обработке оборот пласта должен происходить с углом не менее 45° между его нижней гранью и дном борозды, обеспечивающим равномерную укладку пласта в дно борозды. Крошение почвы при обработке должно создавать не менее 75 % агрегатов с размерами от 1 мм до 10 мм. Сорная растительность должна быть подрезана полностью со всей обрабатываемой площади, а пожнив-ные остатки заделаны в объёме не менее 97 %. Глубина вспашки не должна отклоняться более чем на ± 2 см. При достаточной толщине гумусового слоя вспаш-

ка производится на глубину 20–30 см, а при дефиците гумуса глубина уменьшается до предела от 12 до 20 см [100, 101].

Оптимальная плотность почвы для выращивания сельскохозяйственных культур составляет 1000–1300 кг/м³. После вспашки лугово-чернозёмной и лугово-черноземовидной почвы ее плотность достигает 1235–1240 кг/м³, что свидетельствует о незначительных изменениях. Твердость почвы в пахотном горизонте после обработки снижается с 0,62–1,21 МПа до 0,41–0,81 Мпа [110, 111]. Однако под воздействием ходовых систем машин твердость почвы может увеличиваться на 100–300 кг/м³ [31, 68].

Существующие способы обработки почвы сводятся к минимальной технологии с использованием чизельных и плоскорезущих орудий и традиционной технологии с использованием классического отвального плуга [3]. Процесс основной обработки является одним из самых энергозатратных во всем производстве зерновых. Затраты на топливо в этой операции составляют 20–40 % и 30–40 % всех трудозатрат [4]. С целью энергосбережения ученые исследователи стремятся решить множество задач одним техническим средством. Данный подход привел к появлению множества машин для комбинированной обработки почвы [42].

При выборе минимальной и традиционной технологии обработки почвы любое хозяйство сталкивается с дилеммой. При использовании традиционной технологии происходит переворачивание пласта почвы, что увеличивает вероятность возникновения ветровой эрозии, но данный способ отлично убирает сорную растительность, заделывая ее на глубину до 20 см для полного ее угнетения. В свою очередь, минимальная технология обработки рыхлит почву только лишь на глубине почвы, что улучшает эрозионную стойкость почвы относительно традиционной технологии, но оставляет засорённость поля сорной растительностью и пожнивными остатками, что негативно влияет на дальнейший посев и обработку поля [67, 98].

Согласно данным [115], высокая степень эрозии негативно сказывается на стабилизации природной среды Кубани. Распаханность степного ландшафта

Краснодарского края превышает оптимальные показатели и достигает 90 % и более.

Исследования [43, 47, 114] показали необходимость комбинирования технологий в определённый промежуток времени. Обработка раз в три года отвальным плугом позволяет очистить поле от сорной растительности и за счет ее заделывания накопить гумус в толще почвы.

Обработка почвы занимает важное место в любой технологии по возделыванию сельскохозяйственных культур, особенно в возделывании зерновых культур. В современных условиях качество обработки почвы занимает лидирующие позиции в повышении качества и урожайности культуры. Интенсивное внесение минеральных удобрений и химикатов не позволяет в долгосрочной перспективе получить высокий урожай с сельскохозяйственных земель [101, 119].

Плодородие в большей степени зависит от внутренних процессов обмена питательными элементами и водой между растениями и почвой. В плодородной почве высокое содержание гумуса позволяет полностью раскрыть потенциал культуры и дать высокую урожайность. Также важен воздушный и водный баланс, обеспеченный правильной структурой почвы [53].

Важность обработки почвы сложно переоценить: правильная обработка приводит к образованию в толще земли равномерной структуры с отводами избыточной атмосферной влаги при интенсивных осадках и подводом грунтовых вод при засушливой погоде [34]. В современных тенденциях набирает популярность безотвальная обработка почвы, которая сохраняет почву от переуплотнения. В связи с этим не приходится применять большое количество органических удобрений и пестицидов для поддержания почвы в нормативном состоянии [64].

Безотвальная обработка почвы приводит к разрушению «плужной подошвы», что способствует влагонакоплению в нижних слоях почвы и сохранению водопроницаемости и аэрации в верхних слоях почвы [59].

Безотвальное рыхление почвы (рисунок 1.1) – это щадящий метод обработки почвы, который сводит к минимуму воздействие на почву, сохраняя ее структуру и содержание органических веществ.

Такой прием необходим для многих типов почв и климатических зон. Рыхление при данном способе происходит в глубине почвы, не затрагивая поверхностную корку. В результате разрыхления грунта происходит насыщение его кислородом и водой, что создает оптимальные условия для роста растений и способствует увеличению их урожайности. Безотвальное рыхление также способствует улучшению структуры почвы, что приводит к повышению ее плодородия и урожайности культур [3, 55].

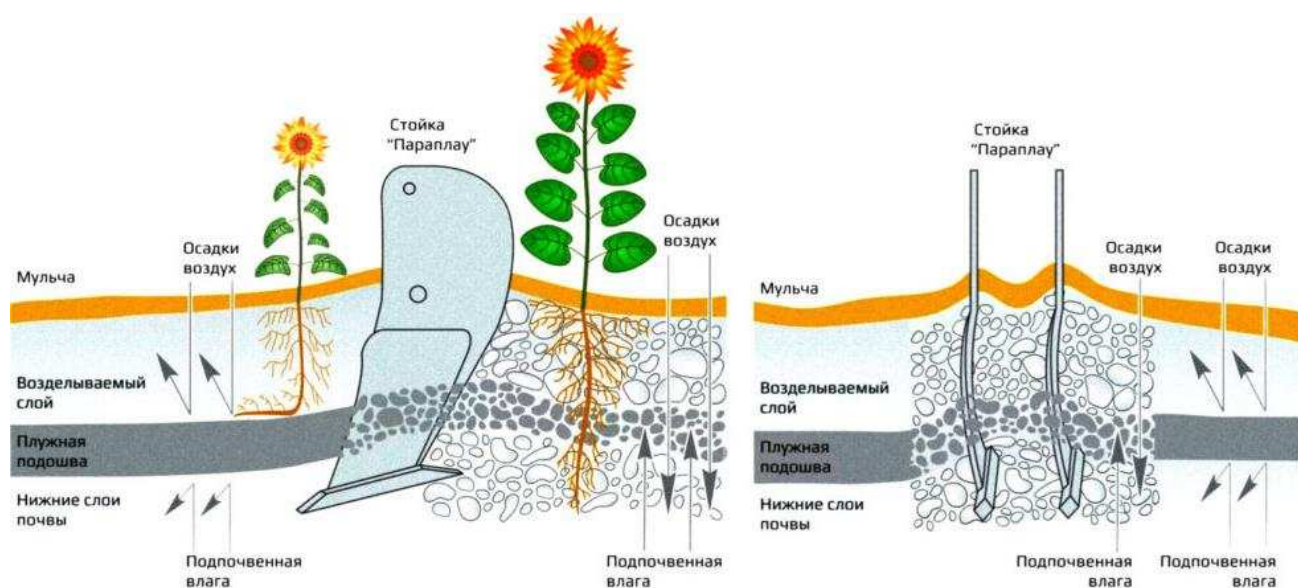


Рисунок 1.1 – Схема безотвального рыхления почвы

При использовании этого способа происходит засорение полей сорной растительностью, на поверхности поля остаются остатки растительности, которые провоцируют заражение растений болезнями. Применение только этого способа вынуждает применять гербициды и пестициды с большей интенсивностью, что негативно сказывается на количестве и качестве урожая. Также твердая корка на поверхности поля быстрее изнашивает сельскохозяйственные орудия, в особенности сеялки [109].

Комбинированная основная обработка с чизеливанием (рисунок 1.2) – это технологический процесс, который включает в себя подрезание, рыхление, оборот и заделку пожнивных остатков. Данный метод обработки позволяет эффективно подготовить почву для посева, сохраняя при этом ее структуру и плодородие [100].

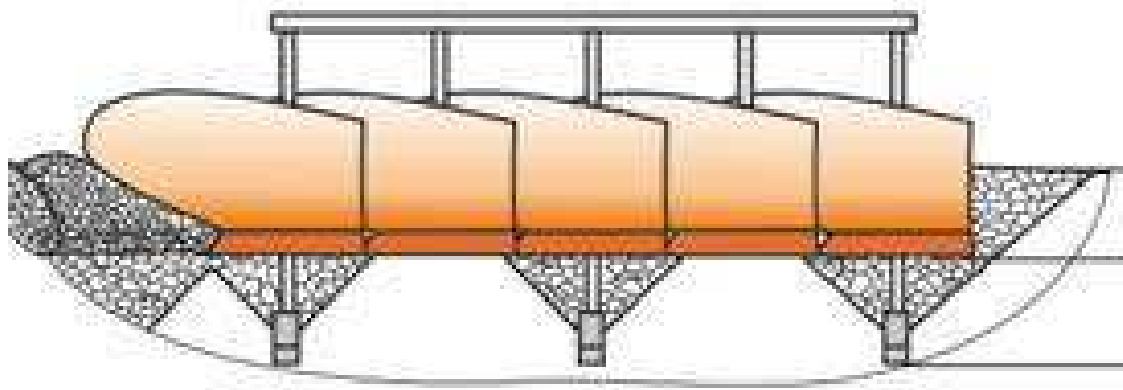


Рисунок 1.2 – Схема комбинированной основной обработки почвы, с чизеливанием

Эффективность сочетания чизельного рабочего органа с классическим отвалом была рассмотрена многими учеными [7, 9, 50]. Этот способ весьма эффективен: исследования показывают заметное увеличение урожайности до 30 % и снижение эрозионного влияния до 20 %. Этот процесс представляет собой комбинированное рыхление с оборотом пласта. На дне борозды почва подрывается и рыхлится чизельной лапой, затем часть разрыхлённого пласта попадает на лемех отвала, который подрезает более широкий пласт и переворачивает его. Данный способ также имеет существенные недостатки: гребнистость дна борозды, высокое энергопотребление, непригодность для всех типов почв. Преимущества комбинированной основной обработки: этот метод позволяет сохранить структуру почвы, что важно для поддержания ее плодородия [36].

Комбинированная основная обработка почв с поверхностным рыхлением (рисунок 1.3) – это технологический процесс, который включает в себя одновременное рыхление и мульчирование почвы. Данный метод позволяет эффективно подготовить почву для посева, сохраняя при этом ее структуру и плодородие. Мульчирование с рыхлением включает в себя рыхление почвы рыхлителем и мульчирование подрезающим лезвием. Мульча смешивается с почвой и укладывается на поверхность поля. Преимущества мульчирования с рыхлением: этот метод позволяет сохранить структуру почвы (что важно для поддержания ее плодородия) и эффективно подготовить почву для посева.

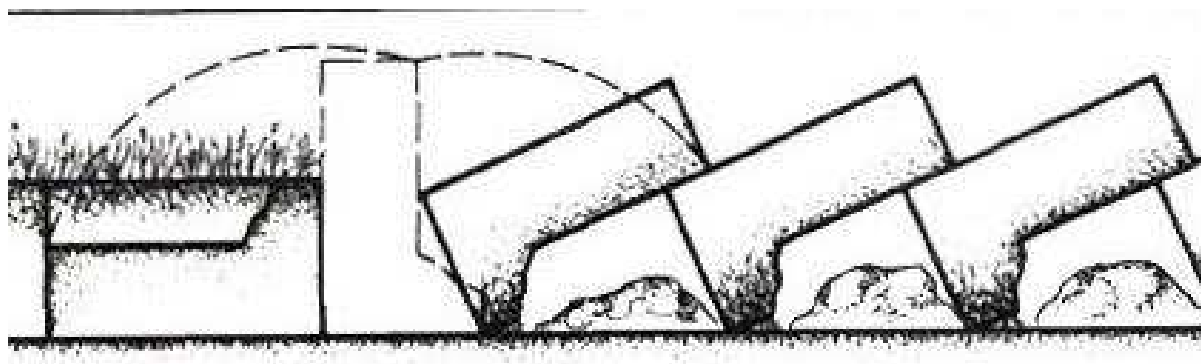


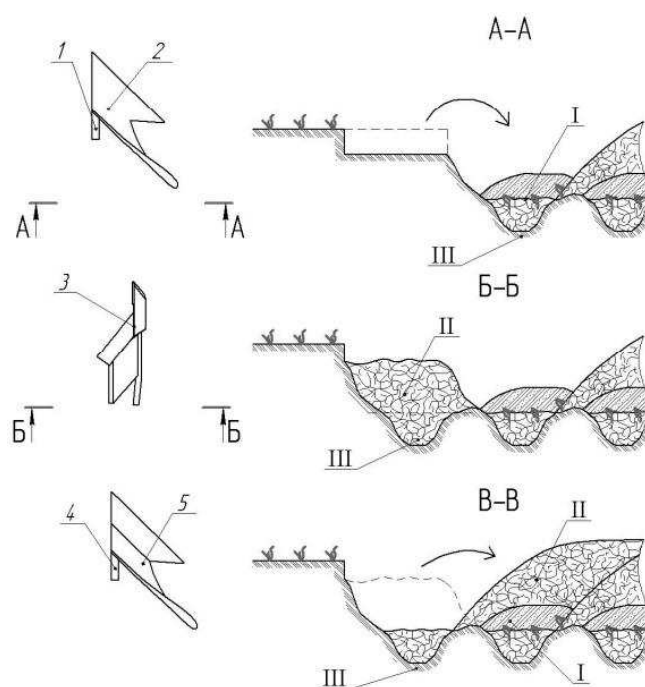
Рисунок 1.3 – Схема комбинированной основной обработки с поверхностным рыхлением

Поверхностное рыхление при данном способе обеспечивается специальными подрезающими лезвиями, выставленными на небольшую глубину. Подрезая небольшую часть пласта, создаются условия повышенного рыхления поверхностной корки пласта.

Машины для основной обработки с поверхностным рыхлением должны быть оснащены специальными приспособлениями для эффективного удаления растительных и пожнивных остатков из обрабатываемого пласта, а также иметь возможность регулировки глубины поверхностного рыхления в зависимости от типа почвы и погодных условий [52].

Данный способ обработки почвы помимо положительного эффекта имеет недостатки: требует дооборудования плуга дополнительным подрезающим лезвием, повышает тяговое сопротивление используемой сельскохозяйственной машины, не подходит для всех типов почв, требует точного регулирования высоты установки подрезающего лезвия [84].

Ярусная отвальная вспашка с рыхлением (рисунок 1.4) – это метод вспашки, при котором почва обрабатывается в несколько этапов, или «ярусов», с использованием отвальных плугов и рыхлителей [112, 113]. Этот метод позволяет достичь более глубокой и равномерной обработки почвы по сравнению с традиционной отвальной вспашкой, что способствует лучшему росту корней растений и более эффективному использованию питательных веществ. Этот метод также эффективен для борьбы с сорняками, так как переворачивание пласта почвы разрушает корневую систему растений и предотвращает прорастание семян.



*I – верхний слой; II – средний слой; III – нижний слой; 1 – верхний ярус; 2 – плоскорез;
3 – рыхлитель; 4 – корпус; 5 – отвал*

Рисунок 1.4 – Схема ярусной отвальной вспашки с рыхлением

Однако, как и традиционная отвальная вспашка, ярусная отвальная вспашка с рыхлением требует большего количества энергии и времени, чем другие методы обработки почвы, и может привести к потере влаги в почве, если не проводится правильный уход за почвой после вспашки. Также этот метод может привести к эрозии почвы, если не соблюдаются правильные методы вспашки и не используются соответствующие методы защиты почвы [17, 56].

Щелевание (рисунок 1.5) – это метод обработки почвы, направленный на создание щелей, чтобы облегчить доступ воздуха и влаги к корням растений, стимулировать их рост и повысить урожайность.

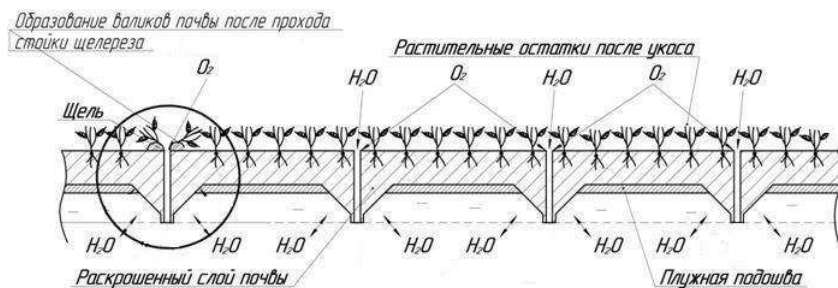


Рисунок 1.5 – Схема щелевания

Целью щелевания является: улучшение водопроницаемости почвы, предотвращение образования почвенной корки, повышение аэрации почвы, стимулирование роста корней растений (за счет создания благоприятных условий для их развития), уменьшение эрозии почвы и сохранение влаги в почве [83, 94].

1.2 Анализ существующих средств механизации для обработки почвы

Чизельный плуг ПЧН-3.2 (рисунок 1.6) предназначен для безотвальной обработки почвы на глубину до 45 см и может использоваться в различных климатических зонах на большинстве типов почв. Орудие имеет прочную цельносварную конструкцию, рабочим элементом которой является витая чизельная стойка с долотообразными наконечниками. Двухрядный опорный самоочищающийся зубчатый каток регулирует глубину обработки и создает мульчирующий слой, измельчая почву на глубину до 12 см.



Рисунок 1.6 – Общий вид плуга серии ПЧН-3.2М

Плуги серии ПЧН отличаются от традиционных плугов расположением рабочих органов в шахматном порядке, что позволяет сократить длину машины и снизить внутреннее напряжение рамы [15]. Ранее на плугах серии ПЧН использовались рабочие органы в виде стрельчатых лап, которые обеспечивали большую ширину подрезания пласта, но меньшее его внутрпочвенное рыхление. Кроме того, в старой машине не применялись кольчатые катки (рисунок 1.7).

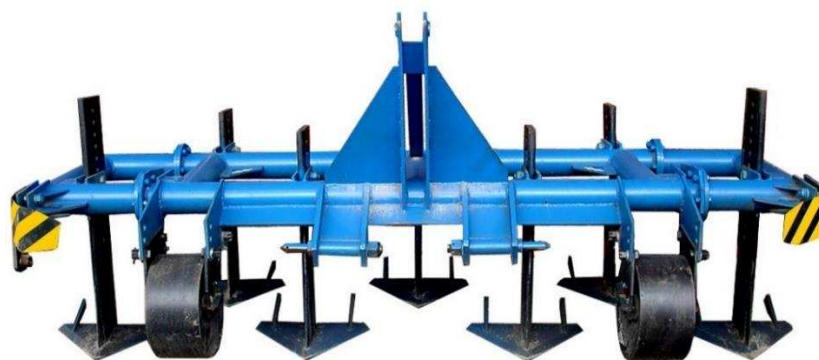


Рисунок 1.7 – Общий вид плуга ПЧН-3.2

Основными недостатками машины ПЧН-3.2 можно считать: работу только в режиме безотвальной обработки, несменные лезвия.

Прицепной рыхлитель Kuhn DC (рисунок 1.8) используется для глубокого рыхления почвы и увеличения глубины пахотного слоя. Рыхлитель оснащен вертикальными и горизонтальными лезвиями и применяется с катком для регулирования глубины и поверхностного рыхления. Эффективное и равномерное подрезание почвы достигается за счет специального профиля кончика лезвия и симметричного расположения лап, а также благодаря углу их установки. Широкие лапы шириной 450 мм обеспечивают равномерное рыхление почвы на всей рабочей ширине. Специальный профиль и угол наклона лапы и наконечника позволяют грунту подниматься волнообразно и разрыхляться без нарушения структуры почвы.



Рисунок 1.8 – Общий вид плуга Kuhn DC

Недостатки: работа только в безотвальном режиме, импортное производство, большая стоимость и высокое тяговое сопротивление [39].

Глубокорыхлитель Гризли 5 (рисунок 1.9) – это орудие для глубокого рыхления почвы, которое может обрабатывать почву на глубину до 50 см. Оно состоит из рабочих органов, расположенных в шахматном порядке, каждый из которых имеет изогнутую стойку с чизелем и дополнительными подрезающими ножами. Данная конструкция рабочего органа обеспечивает дополнительное поверхностное рыхление за счет дополнительных лезвий.



Рисунок 1.9 – Общий вид плуга Гризли 5

Гризли 5 может применяться на различных типах почв и позволяет разрушить плужную подошву, разрыхлить почву и углубить пахотный слой, что способствует сохранению и накоплению влаги, а также предупреждению водной и ветровой эрозии [31, 57]. Он также оснащен шлейфом для дополнительной обработки почвы, который состоит из трубчатого катка с бичами, установленными под углом и сходящимися к центру агрегата.

Недостатки данной машины заключаются в высоком тяговом сопротивлении, низкой функциональности.

Плуг-глубокорыхлитель ГР-70 К/КТ «Берестье» — это многофункциональная сельскохозяйственная машина, разработанная для глубокой обработки почвы на глубину до 60 см (рисунок 1.10). Особенностью данной машины, является систе-

ма подвижной стойки за счет шарнирного закрепления, диапазон регулировки глубины обработки значительно расширяется.



Рисунок 1.10 – Общий вид плуга ГР-70 К/КТ «Берестье»

Плуг-глубокорыхлитель ГР-70 К/КТ «Берестье» имеет несколько недостатков, среди которых можно выделить: сложность конструкции, обслуживания и настройки, низкая функциональность.

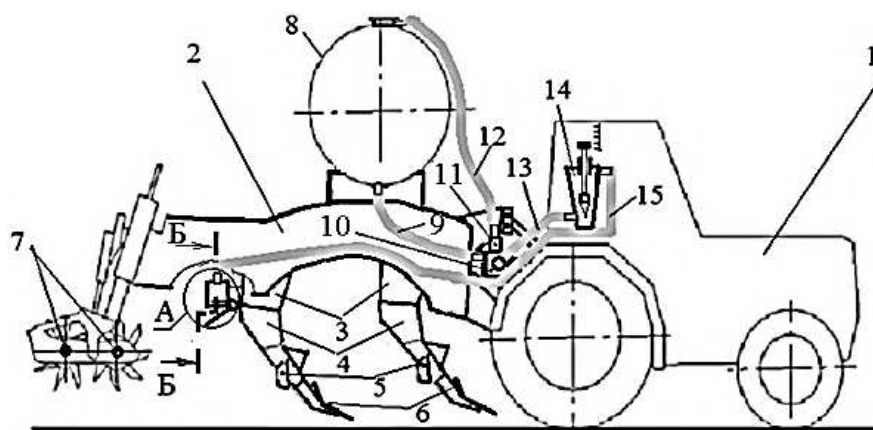
Существуют машины, которые кроме глубокорыхления еще и вносят жидкие органические удобрения, тем самым улучшая плодородие за счет снабжения почвы питательными веществами.

Нами был предложен агрегат Maschio Gaspardo Artiglio 400/9 (рисунок 1.11) с системой внесения удобрений, защищенный патентом на полезную модель № 221238 [75].

Дальнейшая модернизация данной полезной модели велась на основе выявленных недостатков. После доработки предложена машина, защищенная патентом № 2824826 [81], отличающаяся наличием механизма, поддерживающего равномерность подачи жидкости на поле путем поворота подающей балки на угол, который равен углу крена машины.

Обработка почвы с переворачиванием пласта является ключевым этапом в сельском хозяйстве, который положительно влияет на структуру почвы, обо-

гащает ее питательными веществами и повышает урожайность. Для проведения этой процедуры эффективно и качественно используются специальные машины, которые позволяют быстро и эффективно обрабатывать почву с оборотом пласта [55, 60, 103].



1 – трактор; 2 – глубокорыхлитель; 3 – стойка; 4 – ножи; 5 – боковые лезвия; 6 – чизель;
7 – каток; 8 – емкость; 9 – патрубок; 10 – насос; 11 – редукционный клапан;
12 – сбросной клапан; 13 – патрубок; 14 – ротаметр; 15 – патрубок

Рисунок 1.11 – Схема Maschio Gaspardo Artiglio 400/9 с системой внесения удобрений

Одним из наиболее распространенных типов машин для обработки почвы с оборотом пласта являются плуги. Плуги предназначены для переворачивания слоя почвы, что способствует улучшению ее структуры, а также позволяет уничтожить сорную растительность. Современные плуги оснащены регулировками глубины и угла атаки лемехов, что позволяет настраивать обработку под различные типы почв и условия работы [62, 63].

Плуг оборотный полунавесной Peresvet ППО-5/7-35 (рисунок 1.12). Плуг ППО-5/7-35 с изменяемой шириной захвата корпуса (30/35/40 см) и соответствующей шириной захвата плуга (2,1/2,45/2,8 м) предназначен для вспашки почвы на глубину до 30 см. Он оснащен пятью или семью рабочими стойками с ножами и может использоваться в качестве пяти- или семикорпусного плуга. Плуг подходит для различных типов почв (кроме каменистых) и может агрегатироваться с тракторами мощностью 250–280 л.с. Производительность плуга составляет до 1,89/2,2/2,52 га в час в зависимости от ширины захвата.



Рисунок 1.12 – Общий вид оборотного плуга Peresvet ППО-5/7-35

Оборотный плуг ППО-5/7-35 отечественного производства отличается изменяемой шириной захвата за счет изменения угла атаки лемеха с отвалом относительно направления движения машины. Обратная рама является классической схемой для данного класса машин. Двойное количество рабочих органов и механизм оборота весьма утяжеляют машину и делают ее металлоёмкостью значительной [16]. Рама, расположенная по диагонали относительно вектора движения трактора, удлиняет габариты по сравнению с шахматным расположением рабочих органов.

Недостатки: значительные габариты, высокая металлоёмкость, низкая функциональность.

Плуг EuroDiamant 10 7+1 L100 от Lemken (рисунок 1.13) предназначен для вспашки почвы и оснащен семью рабочими корпусами и дополнительным корпусом для увеличения ширины захвата и адаптации к различным почвам [118]. Система автоматической регулировки глубины пахоты облегчает работу оператора и гарантирует равномерную глубину пахоты по всей ширине захвата. После проведения испытаний полунавесного оборотного плуга Lemken Евро Диамант 10 7+1 в [86] была дана эксплуатационная оценка данной машины: с шириной захвата 2,50 м и глубиной пахоты 22,3 см. При использовании в агрегате с трактором John Deere 8430 со скоростью 7 км/ч производительность на вспашке почвы за час составила 1,7 га.



Рисунок 1.13 – Общий вид оборотного плуга EuroDiamant 10 7+1 L100

Удельный расход топлива на сменную работу составил 13,8 кг/га. Коэффициент использования сменного времени составил 0,79. Недостатки: большие габариты, низкая функциональность, высокая стоимость.

Плуг полунавесной поворотный ППП-(6+1+1)×45 (рисунок 1.14) предназначен для вспашки почв с оборотом пласта на глубину до 30 см.



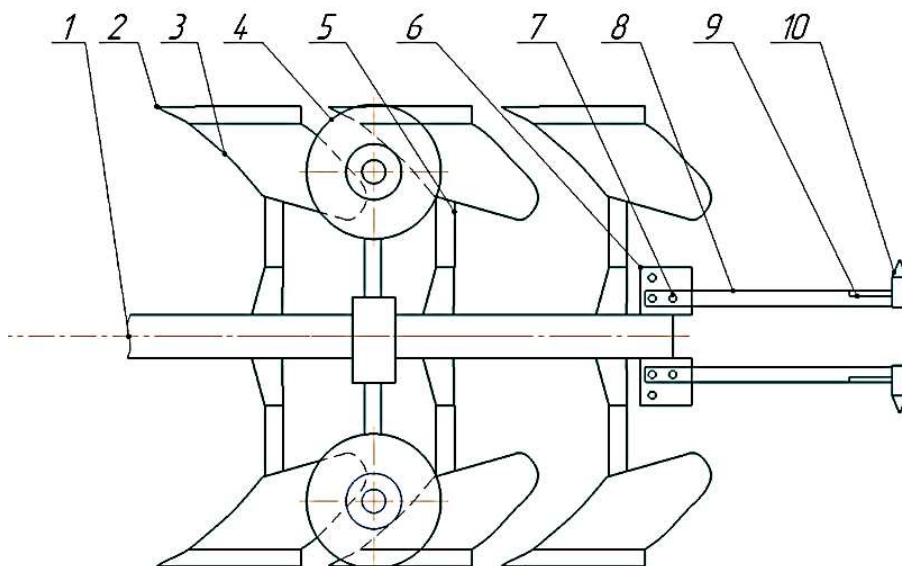
Рисунок 1.14 – Общий вид плуга ППП-6

Главной особенностью является рабочий орган поворотного типа, позволяющий машине, имеющей всего один комплект стоек, работать челночным способом движения, однако из-за характера поверхности рабочего органа машина хорошо обрабатывает почву, но плохо рыхлит [45, 116]. По данным испытательной станции [87] при средней рабочей скорости агрегата 6,8 км/ч и средней рабочей

ширине захвата плуга 3,4 м (7 корпусов), производительность агрегата за час основного времени составила 2,24 га. Производительность за час технологического времени составила 2,15 га, а за час сменного времени – 1,74 га. Удельный расход топлива за время сменной работы составил 25,3 кг/га.

Недостатки: высокий расход топлива, низкая функциональность, сложность механизма поворота, слабое рыхление почвы.

Разработка оборотных плугов не стоит на месте, и одной из возможных модернизаций нами был предложен оборотный плуг, совмещённый с дреномером, представленный на рисунке 1.15.

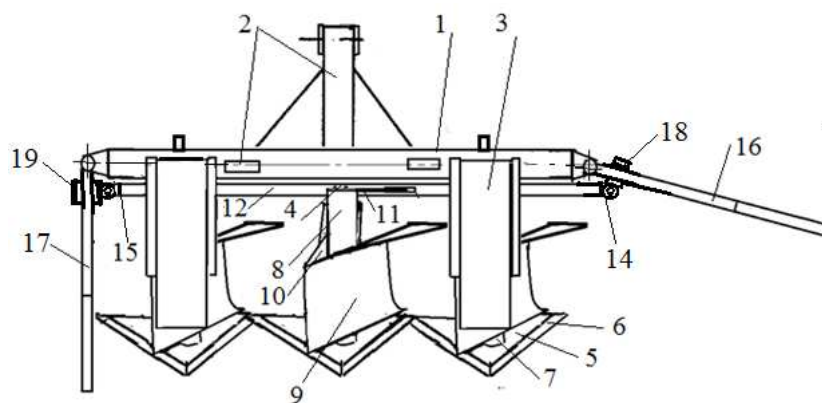


*1 – рама; 2 – левый корпус; 3 – правый корпус; 4 – колеса; 5 – стойки; 6 – кронштейны;
7 – фиксатор; 8 – дополнительные стойки; 9 – лезвие; 10 – дрена*

Рисунок 1.15 – Схема оборотного плуга с дреномером

Машина данного вида позволяет не только рыхлить почву с оборотом пласта, но и создавать дрены для сохранения влаги в почве. Данное техническое решение защищено патентом на полезную модель № 236428 [78].

Для увеличения функциональных возможностей нами разработана комбинированная машина, защищённая патентом на полезную модель № 229905 [77], показанная на рисунке 1.16.



1 – рама; 2 – навеска; 3 – опорные колеса; 4 – стойка; 5 – лапы; 6 – лезвие лапы;
 7 – неподвижное кольцо; 8 – поворотное кольцо; 9 – левосторонний отвал;
 10 – правосторонний отвал; 11 – рычаг поворота; 12 – реечный механизм;
 13 – гидроцилиндр; 14 – поперечина правая; 15 – поперечина левая;
 16, 17 – стойки щелерезов; 18, 19 – прямоугольные кольца

Рисунок 1.16 – Схема комбинированной машины с щелерезом

Комбинированная машина с щелерезом (рисунок 1.16) позволяет эффективно решать сложные задачи по основной обработке почвы, улучшая этот процесс по сравнению с традиционными конструкциями [103].

Плуги серии ПБС (рисунок 1.17) разработаны для отвальной и безотвальной обработки почв под зерновые и технические культуры. Новые плуги ПБС превосходят известные модели за счет низкого тягового сопротивления и универсальности. Центральный брус известных плугов установлен под углом 27–30°, в то время как у ПБС он установлен под углом 45°, что приводит к значительному сокращению габаритов и металлоемкости плуга.



Рисунок 1.17 – Общий вид плуга серии ПБС

Снижение тягового сопротивления достигается благодаря принципиально новой конструкции отвальных и безотвальных рабочих органов. В зависимости от вида обработки почвы, требуемого пользователем, на универсальную раму плуга устанавливаются соответствующие корпуса.

Несмотря на широкие функциональные возможности, в данной машине не реализована возможность работы челночным способом движения, что исключает дополнительную энергоэффективность. Время переоборудования машины и дорогостоящие сменные рабочие органы также стоит отметить, как недостатки данного средства.

Плуг скоростной комбинированный ПСК-5 (рисунок 1.18) разработан для пахоты на глубину от 16 до 35 см под зерновые и технические культуры. При пахоте на тяжелых почвах, если тяговое усилие трактора недостаточно, плуг можно переоборудовать [73].


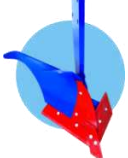
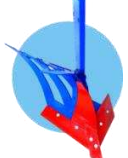


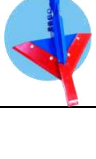
Конструктивные отличия заключаются в следующем: плуги ПСК имеют удлиненный вертикальный лемех, который работает на 10 см ниже обыкновенных плугов. Это позволяет одновременно выполнять пахоту и чизелевание, что особенно полезно на почвах, склонных к образованию плужной подошвы. Плуги ПСК также эффективно помогают накапливать влагу в почве, благодаря ступенчатой форме дна борозды, что особенно актуально на склонах. Но работа классическим способом движения снижает производительность машины и увеличивает затраты топлива [44, 63].



Рисунок 1.18 – Общий вид скоростного комбинированного плуга ПСК-8

Плуг комплектуется различными корпусами таблица 1.1 под каждый вид основной обработки почвы.

Таблица 1.1 – Разновидности устанавливаемых рабочих органов на плуг ПСК

Название	Форма рабочего органа	Назначение
Рабочий орган ПСКу		Комбинированная отвальная вспашка
Рабочий орган ПСКуМ		Комбинированная отвальная вспашка без рыхления обрабатываемого пласта
Рабочий орган ПСКуМп		Комбинированная отвальная вспашка с рыхлением обрабатываемого пласта
Рабочий орган ПСК ЧГ		Щелевание с рыхлением
Рабочий орган ПСК		Отвальная вспашка
Рабочий орган ПСК ПГ		Чизелевание с рыхлением

По данным машиноиспытательной станции [88] при рабочей скорости 8,2 км/ч получена производительность 2,3 га/ч при этом коэффициент сменного времени составил 0,80, что является достаточно низким показателем относительно других типов почвообрабатывающих средств с возможностью петлевых поворотов. Удельный расход топлива во время работы составил 12,4 кг/га.

После анализа различных комбинаций орудий для основной обработки почвы и оценки последующее развитие данных рабочих органов был сделан вывод, что при применении комбинированных средств для вспашки и рыхления почвы уро-

жайность по данным [9, 70, 114] улучшается. Дальнейшее развитие модульности рабочих органов получило в разработке вариаций лемеха, отвала, долота и подрезающей лапы.

Лемешно-отвальный (рисунок 1.19) рабочий орган представляет собой лемешно-отвальную поверхность, соединенную с лезвием подрезающей лапы которые сходятся посередине. Плуг, вспахивая поле, с правой стороны подрезает и оборачивает пласт почвы, а с левой стороны рыхлит на глубину вспашки почву, тем самым улучшая насыщение почвы воздухом.



Рисунок 1.19 – Общий вид лемешно-отвального рабочего органа

Чизельно-отвальный (рисунок 1.20). рабочий орган представляет собой стрелчатую лапу с долотом в своде и отвал, совершающий оборот пласта. Данное средство совершает процесс вспашки с одновременным глубокорыхлением тем самым на дне борозды создавая узкую полоску, которая разуплотняет плужную подошву и отводит избыточную влагу сообщая поверхность с внутрипочвенными водами.



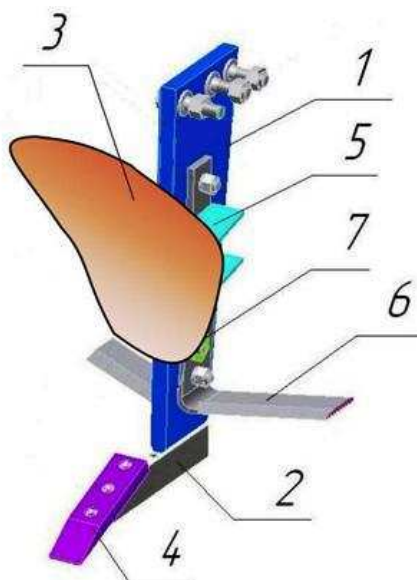
Рисунок 1.20 – Общий вид чизельно-отвального рабочего органа

Чизельный (рисунок 1.21) рабочий орган выполняет классическое глуборыхление. Установка на чизельный рабочий орган дополнительных режущих пластин позволяет добиться большего рыхления почвы.



Рисунок 1.21 – Общий вид чизельного рабочего органа

Рабочие органы «РАНЧО», которые включают в себя отвал с возможностью смещения по высоте стойки, что позволяет использовать это орудие как классический плуг с глубиной обработки в 20–25 см, так и как плуг-глубокорыхлитель с глубиной обработки в 45 см (рисунок 1.22).



1 – стойка; 2 – башмак; 3 – отвал; 4 – долото широкое; 5 – кронштейны; 6 – лапки подрезные;
7 – эксцентрик

Рисунок 1.22 – Схема комбинированного рабочего органа «РАНЧО»

Притом отвал также будет совершать оборот пласта на глубине 10–25 см. Возможна замена долота, исходя из проведения операции щелерез (долото 3 см) и чизелевание (долото 6 см). Лезвия установлены по сторонам стойки, также имеют возможность настраиваться по глубине. Перемещение вдоль стойки может составлять до 35 см. Регулировка вышеизложенных частей плуга позволяет добиться оптимального тягового сопротивления позиционированием на стойке отвала и подрезающих лезвий. Этот рабочий орган можно охарактеризовать как модульную конструкцию для проведения различных операций по почвообработке путем регулировки и замены составляющих этого рабочего органа.

По заявлению автора [36], данный рабочий орган способен выполнять все операции представленных выше рабочих органов ПБС и при том делать это с меньшими издержками. Условие устойчивости выполняется установкой основного бруса под углом 51° , тем самым компенсируют моменты, возникающие при работе рабочего органа, движение происходит без смещения трактора относительно прямолинейного движения.

Основным минусом данного рабочего органа и машины в целом стало отсутствие возможности работы в режиме гладкой вспашки, что приводит к снижению производительности и избыточному экологическому воздействию на почвенный слой [104, 110].

1.3 Обзор научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

Основоположником теории сельскохозяйственных машин и орудий являлся выдающийся русский и советский ученый Василий Прохорович Горячкин. Академик В. П. Горячкин написал целый ряд сочинений по теории плуга [23, 24].

А. Д. Далин установил, что изменение угла установки ножа относительно вертикали в пределах 30° приводит к изменению тягового сопротивления на 6–8 %, кроме того, сопротивление зависит от формы поперечного сечения ножа и от установки его граней относительно вектора движения [33].

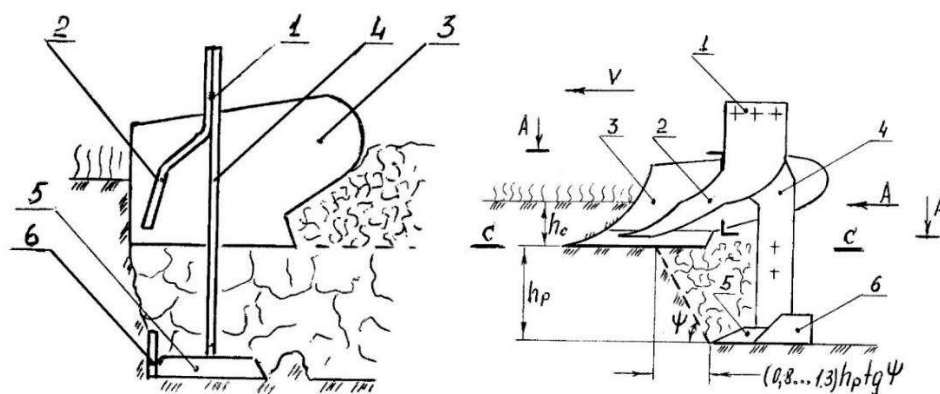
Л. В. Гятчев в своих трудах рассмотрел каждый этап взаимодействия пласта с поверхностью плуга. Описал все фазы движения пласта при вспашке и разделил их на 4 этапа. А также вывел уравнение траектории скольжения частиц по поверхности тупого лезвия и уточнил формулы для расчета силы резания лезвием сухой сыпучей среды, и рассмотрел направления вступления пласта на лемех [32].

Б. Ф. Тарасенко в своих исследованиях [104–110] затрагивает вопросы внесения КАС и обработки почвы различными орудиями включая комбинированные способы. Так, им была предложена универсальная почвообрабатывающая машина, состоявшая из 4 рядов различных рабочих органов.

Б. Н. Нуралин рассмотрел в своих исследованиях важность работы в режиме гладкой вспашки и обосновал ромбовидный рабочий орган для такой обработки почвы [65].

А. С. Путрин рассмотрел в своих трудах проблему уменьшения тягового сопротивления комбинированных агрегатов для вспашки почвы. В своих исследованиях профессор пришел к аналитической модели движения плуга и комбинированного рабочего органа в почвенной среде. Выведенные им закономерности используются для конструирования плугов различной формы. В своих исследованиях он предложил новую конструкцию комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа (рисунок 1.23), основной особенностью которого была способность изменять углы наклона отвальной поверхности в диапазоне 15–60 градусов, тем самым данный рабочий орган может быть адаптирован к различным почвенным условиям [90].

Главной особенностью рабочего органа А. С. Путрина стало объединение обеих стоек, соединяющихся в единую стойку, которая затем разветвляется на два кронштейна внизу. К одному кронштейну крепится рабочая поверхность, а к другому культиватор с полевой доской. Полевая доска расположена под углом от 2 до 5 градусов по отношению к направлению движения.



1 – стойки; 2 – кронштейн; 3 – лемешно-отвальная поверхность; 4 – кронштейн;
5 – рыхлитель; 6 – полевая доска

Рисунок 1.23 – Схема комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа

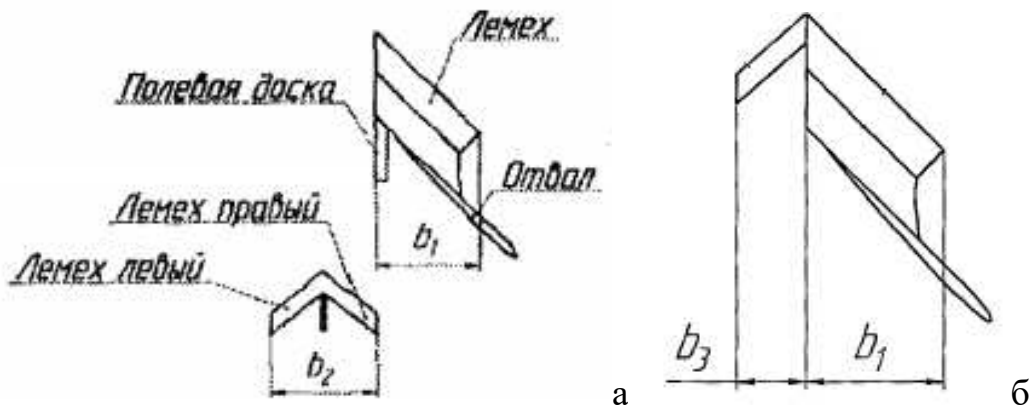
А. С. Путрина

Нижний край культиватора расположен под лезвием лемеха высотой от 0,1 до 8,5 мм. Этот рабочий орган может работать в двух режимах, используя как лемех, так и культиватор, что позволяет одновременно производить поверхностное рыхление верхнего слоя почвы и глубокую обработку нижнего слоя без рыхления [74]. Недостатки: высокое тяговое сопротивление, отсутствие челночного способа работы.

И. Б. Борисенко и П. И. Борисенко [12–14] в своих трудах рассмотрели обработку почвы усовершенствованным комбинированным чизельным орудием. Так, по их исследованиям можно сказать, что при использовании чизельного орудия с дополнительными подрезающими лезвиями и отвалом снижается потеря гумуса в 3 раза, разрушается плужная подошва, тем самым улучшая продуктивный запас влаги в слое до 30 см в среднем на 25%. Снижается тяговое сопротивление, в отличие от лемешного рабочего органа на 40%, повышается урожайность на 6–8%.

Е. В. Бойкова и В. М. Бойков [10, 11, 93] провели исследование комбинированного рабочего органа, объединяющего отвальную и безотвальную обработку почвы. Получившийся комбинированный агрегат повысил часовую производительность на 28% и снизил затраты труда на 17%. Это было достигнуто за счет меньшей энергозатратности процесса основной обработки почвы.

По результатам исследования одновременного безотвального рыхления и оборота пласта в диссертации [11] на ученую степень кандидата технических наук Е. В. Бойкова предложила следующую схему обработки почвы (рисунок 1.24), а также предложила рабочий орган с объединением плоскорежущей лапы с отвалом. Но данная схема не лишена недостатков. Главным недостатком этого комбинированного агрегата является не универсальность, так как работа этой машиной возможна только всвал-развал, что увеличивает холостые проезды и со временем приводит к образованию свальных или развальных борозд.



а – комбинация отвала и плоскореза; б – комбинированный рабочий орган;

b_1 – ширина захвата корпуса отвального плуга; b_2 – ширина захвата плоскорежущей лапы;

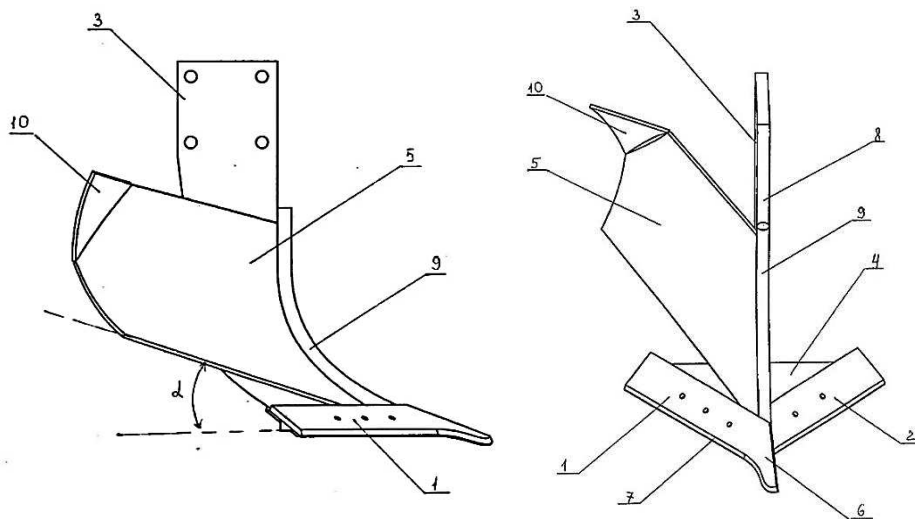
b_3 – половина ширины плоскорежущей лапы

Рисунок 1.24 – Схема комбинации рабочих органов для энергосберегающей обработки почвы
Е. В. Бойковой

Анализируя данную схему (рисунок 1.24), можно отметить некоторые особенности конструкции. Предлагаемый рабочий орган лишен возможности производить только безотвальную обработку почвы, что является существенной недоделкой в современных технологиях обработки почвы. Еще стоит отметить, что у современных машин для отвальной обработки почвы есть регулировки ширины захвата, обеспечивающиеся выбором угла установки отвала в небольшом диапазоне, а у данной машины нет такой возможности.

На схеме (рисунок 1.24) видно, что подрезающая лапа выполняет безотвальную обработку почвы, а отвал совершает отвальную обработку. При этом ширина захвата лапы в два раза больше, чем у отвала.

Особенность рабочего органа Е. В. Бойковой (рисунок 1.25) заключается в предотвращении прилипания почвы, благодаря использованию рабочих органов особой конструкции с отвалами и уменьшению высоты гребней при обработке почвы за счет их специальной формы и расположения. Задача решается путем оснащения рабочего органа почвообрабатывающего орудия отвалом, закрепленным на стойке справа под углом 15–60 градусов к направлению движения. Правый лемех имеет выступающий носок, а сама стойка выполнена плоской с изогнутыми передней и задней сторонами. Носок правого лемеха может иметь форму долота с прямой режущей кромкой или же криволинейной формой. Углы наклона левых и правых лемехов к основанию рабочего органа составляют 20–35 градусов, а их режущие кромки находятся в одной плоскости. Нож правого лемеха расположен на 2–6 см ниже режущих кромок левого лемеха, а сам правый лемех смещен относительно левого по направлению движения.



1 – правосторонний лемех; 2 – левосторонний лемех; 3 – стойка; 4 – основание; 5 – отвал;
6 – носок лемеха; 8 – торцевая поверхность стойки; 9 – обтекатель

Рисунок 1.25 – Схема комбинированного почвообрабатывающего рабочего органа Е. В. Бойковой

Недостатки: низкая функциональность, отсутствие челночного способа работы.

В современных исследованиях почвообработки в основном применяются формулы академика В. П. Горячкина. На базе выведенных им формул ведутся дальнейшие исследования. Е. В. Бойкова в своих исследованиях рассматривала комбинированный рабочий орган, состоящий из стрелчатой лапы и отвала, пользуясь формулами В. П. Горячкина. Суммарное тяговое сопротивление находилось по следующей формуле [11]:

$$K_y = (G_1 f_1 + k_1 (a_r b_1 - 0,5 a_r^2) + \delta_1 (a_r b_1 - 0,5 a_r a_r^2) v_{\text{ка}}^2) 0,75 + (G'_2 f_2 + k_2 (a_r b_3 + 0,5 a_r^2) + \delta_2 (a_r b_3 + 0,5 a_r^2) v_{\text{ка}}^2) / a_r b_4, \quad (1.1)$$

где G_1 – сила тяжести корпуса плуга, Н; f_1 – коэффициент трения корпуса плуга о почву; k_1 – коэффициент деформации почвенного пласта от действия корпуса плуга; a_r – глубина обработки почвы, м; $v_{\text{ка}}$ – скорость движения комбинированного агрегата, м/с; G'_2 – сила тяжести лемеха, Н; δ_1 – коэффициент, зависящий от формы корпуса плуга и свойств почвы, кНс²/м⁴; δ_2 – коэффициент, зависящий от формы лемеха стрелчатой лапы и свойств почвы, кНс²/м⁴; b_1 – ширина захвата корпуса плуга, м; b_3 – ширина захвата левого лемеха стрелчатой лапы, м; b_4 – ширина захвата комбинированного рабочего органа, м.

В данной формуле обобщено влияние таких факторов, как характеристики почвы, угол поворота отвала, но не учтен обратный угол резания и другие параметры, влияющие на тяговое сопротивление комбинированного рабочего органа.

С. В. Марнов в своем научном труде разработал и исследовал поворотный плуг (рисунок 1.26), использование которого повысило производительность пахотного агрегата на 10 % и снизило расход топлива на 8 %, а также повысило коэффициент использования сменного времени на 11 %. Основной положительный эффект достигается за счет модернизации машины, которая позволяет за счет поворотного механизма и объединённых отвалов с лемехами работать в режиме гладкой вспашки [45].

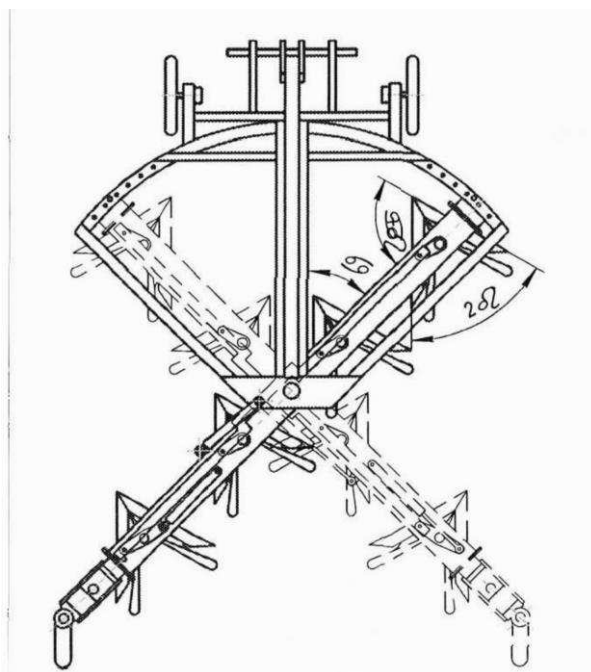


Рисунок 1.26 – Общий вид плуга С. В. Марнова

Разработанный им плуг (рисунок 1.26) включает в себя отвалы, установленные на поворотной стойке под определённым углом друг к другу, а также лемеха левого и правого направления, которые формируют комбинированные поверхности лемеха и отвала. К нижней части стойки прикреплен башмак в форме равностороннего треугольника, через ортоцентр которого проходит мгновенный центр вращения корпуса [80].

Анализируя данную машину, можно отметить следующие недостатки: значительные габариты, низкую функциональность.

А. Е. Доценко [36] разработал настраиваемый комбинированный рабочий орган для улучшения оптимального агрегатного состояния различных по глубине слоев почвы. Результаты его работы показали, что применение комбинированного чизельного рабочего органа способствовало снижению нагрузки на отвальный корпус в 3 раза и снижение затрат труда на 17 %. Он исследовал процесс основной обработки почвы долотообразным рабочим органом с устанавливаемым на стойку отвалом. Основываясь на снижении эрозионного влияния, им был предложен рабочий орган следующего вида (рисунок 1.27).

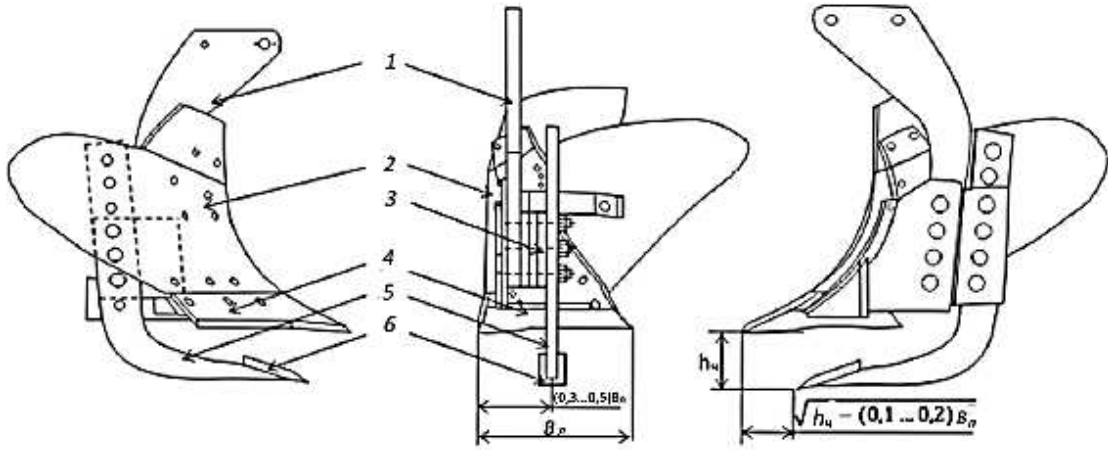


Рисунок 1.27 – Схема комбинированного рабочего органа А. Е. Доценко

Данный рабочий орган состоит из стойки 1, смещенной на некоторое расстояние относительно чизельной лапы 5 с закрепленным лезвием 6 на ней, а также выставляемым по высоте корпусом плуга, состоящем из лемеха 4, отвала 2 и дистанционной проставки 3.

Недостатки: отсутствие челночного способа работы, сложность настройки.

В расчетах на тяговое сопротивление плуга А. Е. Доценко применял усовершенствованную В. В. Труфановым [111] теорию В. П. Горячкина. Преобразовав данную формулу, Доценко А. Е. получил формулу тягового сопротивления своего рабочего органа в следующем виде [36]:

$$K_y = \frac{G_1 f_k + n_k (S_q (k'' + \pi_1 v_{па}^2) + S_l (k_1 + \pi_1 v_{па}^2))}{n_k S_q}, \quad (1.2)$$

где k'' – коэффициент, характеризующий способность почвенного пласта сопротивляться деформации, Н/м²; f_k – коэффициент трения корпуса почвообрабатывающего орудия о почву; π_1 – коэффициент, зависящий от формы рабочего органа и свойств почвы, Н · с²/м⁴; $v_{па}^2$ – рабочая скорость пахотного агрегата, м/с; n_k – количество рабочих органов, шт; S_q – площадь обработки чизельным рабочим органом, м²; S_l – площадь обработки лемешным рабочим органом, м².

Дальнейшие проведенные полевые испытания показали, что обработка почвы новым рабочим органом снижает твердость почвы в слое 15–20 см на 1000 %, тем

самым снижая тяговое сопротивление от 65 до 70 % [36, 84]. Несмотря на это, формула данного вида не учитывает применяемые чизельные лапы треугольного вида. Коэффициенты, использованные в этой формуле, сильно упрощены, и учет важных параметров, таких как характеристики почвы и форма поверхности отвала, не рассмотрена в полном объёме. Тем самым можно сказать, что вопрос не раскрыт полностью.

С. В. Белоусов провел исследование отвального плуга с плоскорежущей пластиной. Его исследования показали, что плуг с установленными дополнительными пластинами дает снижение: затрат труда на 0,08 чел.-ч/га; энергоёмкости вспашки на 4,5 кВт. ч/га; тягового сопротивления от 9 до 13 % в зависимости от длины плоскорежущей пластины. В своих исследованиях он предложил и теоретически обосновал рабочий орган (рисунок 1.28) с дополнительной плоскорежущей пластиной для улучшения крошения почвы и снижения тягового сопротивления за счет улучшения устойчивости хода [7].

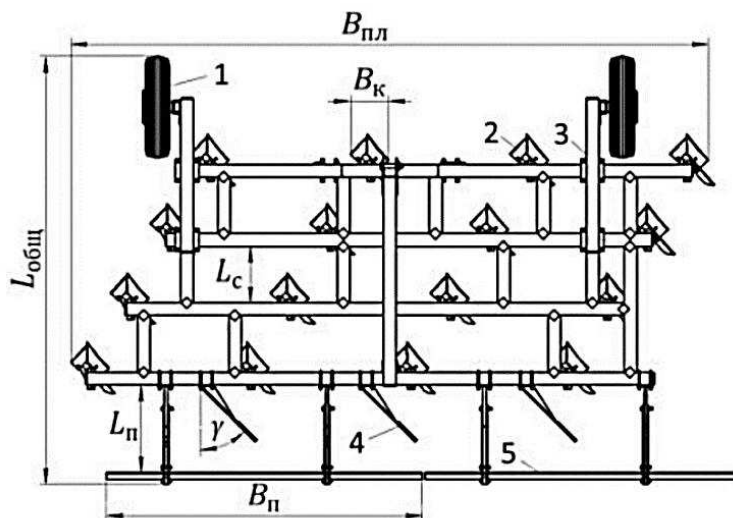


Рисунок 1.28 – Общий вид корпуса плуга С. В. Белоусова

Проведя анализ с аналогичными машинами, стоит отметить низкую функциональность, а также низкую возможность регулирования глубины послойной обработки.

И. А. Башмаков разработал секционный плуг (рисунок 1.29) с изменяемой шириной захвата от 3,8 до 6,1 м. За основу плуга были взяты комбинированные рабочие органы ПБС и четырехбрусная схема с диагональным расположением ра-

бочих органов на каждой секции. По результатам исследований применение такого вида рамы позволит снизить энергоемкость на $30 \text{ кВт} \cdot \text{ч/га}$ [6].



$B_{пл}$ – ширина захвата плуга; $B_{к}$ – ширина захвата корпуса; $L_{с}$ – длина секции;
 $L_{п}$, $B_{п}$ – длина и ширина приспособлений; $L_{общ}$ – общая длина плуга; 1 – колесный узел;
 2 – корпус плуга; 3 – рама плуга; 4, 6 – сталкиватели; 5 – выравниватель пашни

Рисунок 1.29 – Схема вид секционного плуга И. А. Башмакова

Для определения тягового сопротивления секционного плуга И. А. Башмаков использовал рациональную формулу академика В. П. Горячкина, которая описывает тяговое сопротивление плугов ПБС [6]:

$$R_{пл} = 0,8G_1 + 35,5a_{г}B_{пл} + 1,58a_{г}B_{пл}v_{пл}^2, \quad (1.3)$$

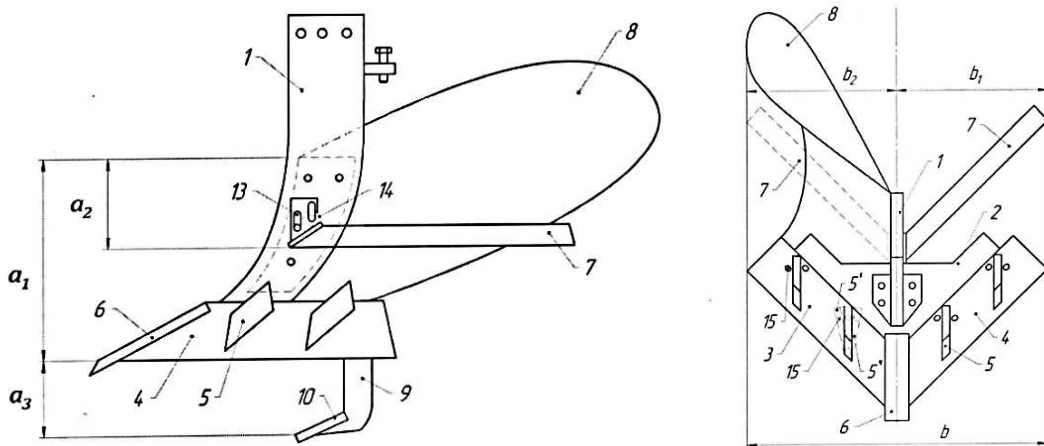
где $B_{пл}$ – ширина захвата плуга, м; $v_{пл}^2$ – скорость движения плуга, м/с.

Формула (1.3) для расчета тягового сопротивления секционного плуга основывается на упрощенной формуле В. П. Горячкина, которая не может в полной мере описать все составляющие тягового сопротивления комбинированного почвообрабатывающего органа ПБС. По этой формуле невозможно получить зависимости тягового сопротивления от изменения геометрических и режимных параметров исследуемого рабочего органа.

Секционный плуг хоть и уменьшает расстояние, пройденное по полю в холостую, но не решает эту проблему полностью. Отсутствие возможности работы

челночным способом сильно увеличивает пройденное расстояние в холостую [116].

Рабочий элемент сельскохозяйственного орудия, разработанный Р. С. Рахимовым (рисунок 1.30), состоит из множества регулируемых модульных элементов.



1 – стойка; 2 – башмак; 3 – правое лезвие; 4 – левое лезвие; 5 – съёмный рыхлитель;
6 – основное долото; 7 – левый и правый крошащие ножи; 8 – отвал; 9 – щелерез; 10 – долото;
12 – пружинный предохранитель; 13 – удлиненные отверстия; 14 – шарнир; 15 – отверстие;
 b_1 – ширина захвата безотвальной части; b_2 – ширина захвата отвальной части;
 a_1 – глубина сплошной обработки; a_2 – глубина хода рыхлящих ножей;
 a_3 – глубина обработки щелевателем

Рисунок 1.30 – Схема универсального почвообрабатывающего рабочего органа Р. С. Рахимова.

Справа от стойки расположены правое лезвие и основное долото, прикрепленные к основанию с помощью крепежных пластин. Стойка также присоединяется к раме машины и имеет плоскую форму с криволинейными передней и задней сторонами. На передней стороне стойки может быть установлен обтекатель, изготовленный из металлической трубки, для предотвращения налипания земли на стойку [91]. Орудие также оборудовано отвалом, закрепленным на стойке справа под углом от 15 до 60 градусов относительно направления движения. Отвал может быть съёмным, а угол между его нижней кромкой и основой рабочего элемента не должен превышать 30 градусов.

Недостатки: отсутствие работы в режиме гладкой вспашке, высокое тяговое сопротивление, сложность настройки.

Вышеизложенные исследования показывают, что отсутствуют исследования по определению тягового сопротивления комбинированного рабочего органа с возможностью поворота отвала. Также исследования не раскрывают возможности работы данными средствами в разных почвенных слоях на различных скоростях.

Новое средство позволит осуществлять с различной периодичностью отвальную и безотвальную обработку почвы, тем самым способствуя сохранению гумуса в почве, противостоять водной и ветровой эрозии.

Создание машины такого инновационного вида несет значительную практическую ценность, повышая функциональность и снижая энергозатраты. Многофункциональное почвообрабатывающее средство, созданное на основе рабочего органа в виде стрелчатой лапы, способное работать в режиме гладкой вспашки и в режиме безотвальной обработки, позволит решать вышесказанные проблемы.

1.4 Выводы. Цель и задачи исследования

На основе анализа конструкций технических средств и научно-исследовательских работ можно сделать следующие выводы:

– анализ большинства серийных комбинированных почвообрабатывающих машин показал, что они обладают повышенными энергетическими затратами, низкой функциональной возможностью;

– наиболее распространенным и менее энергоемким по сравнению с остальными приемами обработки почвы является комбинированная обработка почвы, позволяющая снизить энергозатраты;

– для выполнения комбинированной основной обработки применяются комбинированные почвообрабатывающие машины, которые неспособны работать челночным способом движения;

– определение тягового сопротивления многофункционального средства для основной обработки почвы с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой,

сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом в зависимости от их конструктивных параметров и условий работы недостаточно изучено.

Проблема. Низкая функциональность существующих средств для основной обработки почвы не может обеспечить должную энергоэффективность при обработке почвы.

Рабочая гипотеза. Снижение затрат энергии и повышение качества обработки почвы под зерновые культуры можно обеспечить обоснованием параметров и режимов работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом.

Цель работы – обоснование параметров и режимов работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом, обеспечит снижение затрат энергии и повышение качества обработки почвы для зерновых культур.

Для достижения поставленной цели исследований были поставлены следующие **задачи исследований**.

1. Разработать конструктивно-технологическую схему многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой для основной обработки почвы под зерновые культуры.

2. Получить аналитические зависимости тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства от его параметров и режима работы.

3. Экспериментальным путем определить оптимальные параметры и режимы работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой по критерию удельного тягового сопротивления.

4. Выполнить оценку сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований.

5. Выполнить расчеты экономической эффективности предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства.

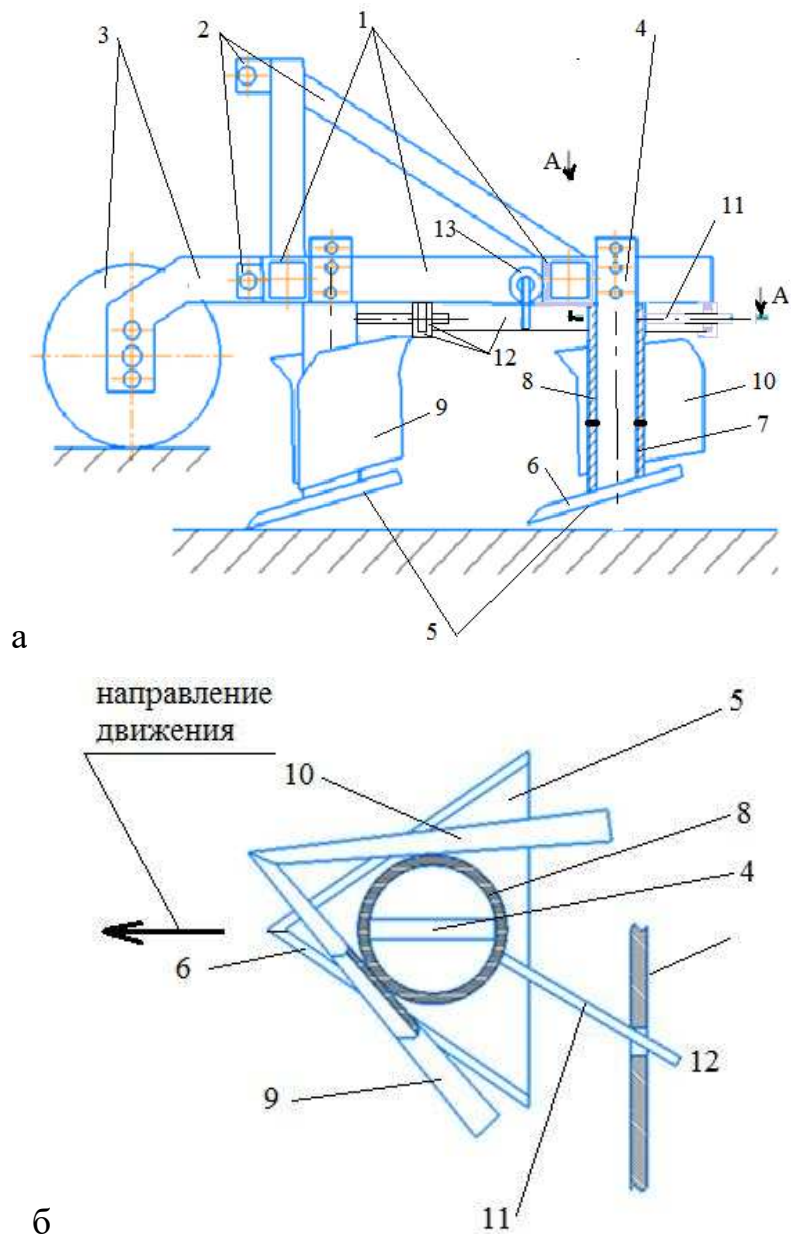
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИМ СРЕДСТВОМ

2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего средства

Анализируя выше сказанное, было разработано средство на базе глубокого рыхлителя ПЧН-3.2 с установкой на него системы поворотных отвалов, выполняющих функцию отваливания почвы [58, 108]. Данное средство должно включить в себя все основные перечисленные выше положительные наработки ученых, которые занимались этими исследованиями в последние годы. Многофункциональность созданного средства и возможность работать в режиме гладкой пахоты позволит снизить энергоемкость обработки почвы. Данные преимущества приведут к снижению экономических издержек на обработку почвы.

Разработанное многофункциональное почвообрабатывающее средство, защищенное патентом на полезную модель № 225628 [76], представлено на рисунке 2.1. Устройство многофункционального средства заключается в сварной раме, оснащенной двумя брусьями, на которые установлена система трехточечной навески для соединения с трактором, а также механизма регулировки глубины обработки, реализованного с помощью опорных колес, которые могут быть установлены на различных высотах. На брусьях рамы в шахматном порядке установлены кронштейны, предназначенные для монтажа рабочих органов. Кроме того, средство имеет возможность быстрого переоборудования в чизель путем демонтажа системы отвалов, что позволяет расширить ее функциональные возможности [117].

Рабочие органы многофункционального средства включают стойки, изготовленные из стальных пластин, к нижней части которых под углом крепятся чизельные лапы, имеющие форму треугольной пластины с лезвиями по краям.



а – главный вид; б – сечение А-А;

1 – рама; 2 – навеска; 3 – опорное колесо; 4 – стойка; 5 – лапа; 6 – лезвие;

7 – неподвижное кольцо; 8 – поворотное кольцо; 9 – левосторонний отвал;

10 – правосторонний отвал; 11 – рычаг порота; 12 – реечный механизм; 13 – гидроцилиндр

Рисунок 2.1 – Принципиальная схема многофункционального почвообрабатывающего средства

На стойки сначала устанавливаются неподвижные кольца, оснащенные ограничителями для предотвращения проворачивания и скошенной нижней частью для плотного прилегания к лапам. Затем на стойки надеваются поворотные кольца, оснащенные кронштейнами, к которым приварены левосторонний и правосторонний отвалы, расположенные под углом друг к другу. Кроме того, поворотные

кольца оснащены рычагами поворота, которые соединены с реечным механизмом, состоящим из двух пластинчатых реек с отверстиями, установленных в направляющих, прикрепленных к раме. Реечный механизм дополнительно оснащен поперечиной, к которой прикреплен гидроцилиндр, установленный на бруске рамы, что обеспечивает возможность регулирования положения системы отвалов.

Работа многофункционального средства осуществляется в несколько этапов. В транспортном положении средство поднимается системой трехточечной навески, а гидроцилиндр приводит к перемещению реек реечного механизма, что устанавливает левосторонний отвал в направлении движения. При движении вперед рабочие органы погружаются в почву на заданную глубину, где лапы с лезвием по краям выполняют функцию подрезания пласта, а левосторонний отвал создает отвальную поверхность для перемещения и поворота пласта почвы.

После завершения прохода многофункциональное средство возвращается в транспортное положение, и гидроцилиндр устанавливает правосторонний отвал в направлении движения. Для работы в режиме безотвального рыхления реечный механизм демонтируется, а поворотные кольца и рычаги снимаются со стоек. Лапа, установленная под углом к поверхности почвы, подрезает и рыхлит пласт, удаляя корни сорняков и разрушая плужную подошву, что способствует аэрации почвы и увеличению ее влагоемкости. Глубина обработки регулируется с помощью опорных колес и повторного закрепления стойки.

Применение предложенного многофункционального почвообрабатывающего средства обеспечит: расширение функциональных возможностей, снижение фактора экологического воздействия, снижение энергетических затрат и повышение производительности. Экономическая эффективность будет достигаться из-за комбинирования отвальной и безотвальной обработки при помощи одного многофункционального средства и снижения энергетических затрат [121].

Угол наклона лапы позволит не уплотнять дно борозды, что улучшит аэрацию и связь почвы с подземными водами [108].

2.2 Получение аналитической зависимости тягового сопротивления многофункционального средства

Расчет тягового сопротивления рабочего органа многофункционального средства будем рассматривать на основе теорий [23, 24, 99]. Общая формула тягового сопротивления рабочего органа многофункционального средства имеет вид [94]:

$$P = S_x + Q_{nx} + R_x + P_T, \quad (2.1)$$

где S_x – усилие на резание почвы лезвием лапы, Н; Q_{nx} – усилие на деформацию почвы лапой, Н; R_x – усилие на сообщения скорости частицам пласта, Н; P_T – усилие на преодоления веса и трения пласта распределенного по поверхности соприкосновения пласта с отвалом, Н.

Определяем силы, возникающие при резании почвы лезвием лапы. При низкой влажности почвы силы трения внутри сыпучего тела близки к сухому, тем самым зависимость между усилием резания и скоростью деформации выражена слабо.

При повышенной влажности жидкая фаза почвы, обволакивающая каждую частицу, содержит некоторое количество органического вещества (перегноя), находящегося в растворенном и коллоидальном состоянии, что придает жидкой фазе почвы определенную вязкость. В этом случае более резко выражена зависимость усилий от скорости деформации.

Примем допущение, считая почву как сыпучее тело, между частицами которого возникает сухое трение. Свойства такой почвы можно охарактеризовать величиной нормального давления, при котором начинается перемещение частиц, соприкасающихся с поверхностью лезвия относительно неподвижных частиц. Силы сухого трения между частицами, в свою очередь, пропорциональны статическому давлению в данной точке объема [19, 24].

$$k = \frac{dp}{dF_n}, \quad (2.2)$$

где dp – элементарное внутреннее усилие частицы пласта; dF_n – элементарная площадь поперечного сечения частицы пласта.

Найдем усилие на резание почвы лезвием лапы. Лезвие при резании раздвигает частицы почвы и силы трения между частицами во всех точках поверхности лезвия достигают предельных значений статического давления. Пренебрегаем толщиной горизонтально расположенного лезвия. Считаем для всех точек поверхности лезвия $h = \text{const}$, тогда можно рассматривать нормальные напряжения среды во всех точках касания с лезвием при движении постоянными.

Найдем величину нормального давления:

$$k = 0,1k_0\rho gh, \quad (2.3)$$

где k_0 – безразмерная постоянная, характеризующая фрикционные свойства разрезаемой среды, $k_0 = 10 \dots 100$ [32, 99]; ρ – плотность почвы, кг/м^3 ; g – гравитационная постоянная, м/с^2 ; h – глубина обработки, м.

Примем, что лезвие лапы имеет форму циклоиды (рисунок 2.2), тогда радиус кривизны лезвия лапы имеет вид:

$$\mu = 4rcos(\varepsilon), \quad (2.4)$$

где r – радиус производящего круга, м; ε – угол заточки лезвия, рад.

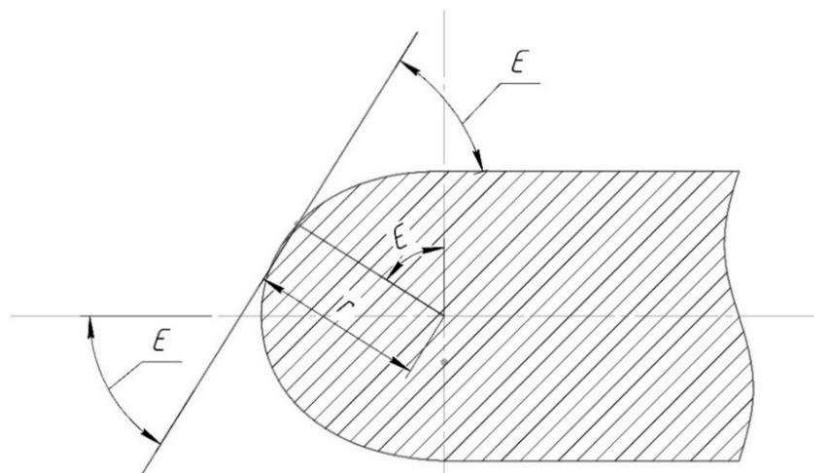
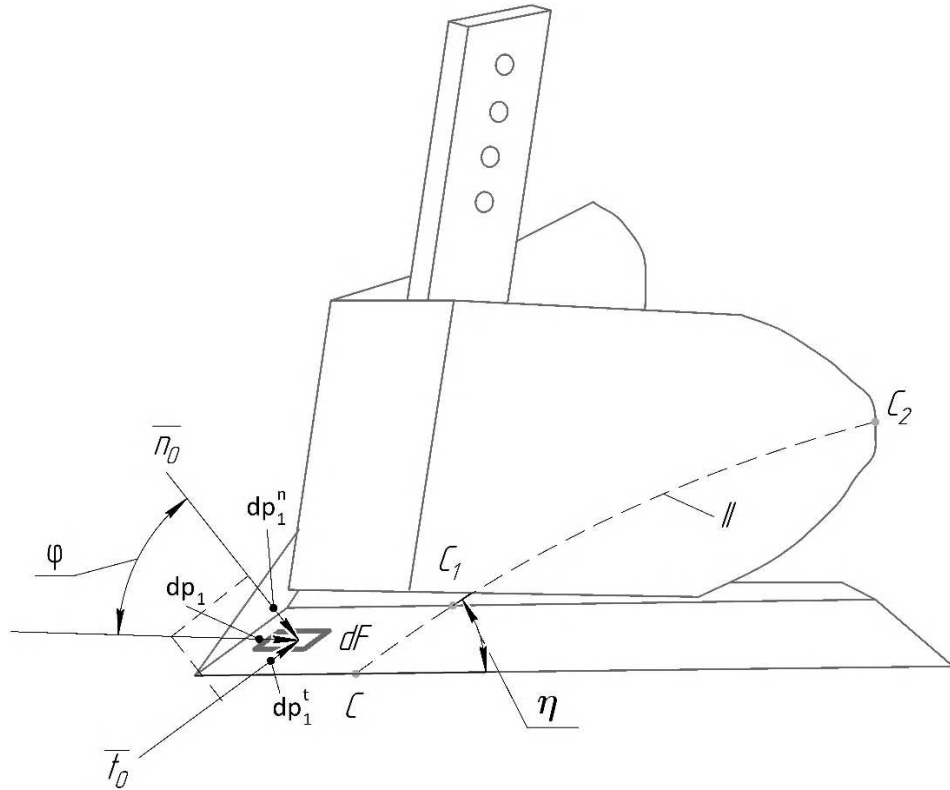


Рисунок 2.2 – Форма лезвия лапы

Обозначим через $d\bar{p}_1$ – элементарное статическое усилие на раздвигание частиц, соответствующей элементарной площадке dF поверхности лезвия (рисунок 2.3). При этом $d\bar{p}_1$ отклонена от нормали к элементарной площадке поверхности лезвия на угол трения φ ; η – угол между лезвием лапы и касательной к относительной траектории движения частицы пласта.



II – относительная траектория движения пласта

Рисунок 2.3 – Схема сил, действующих на единичную площадку

Между указанными величинами существует зависимость:

$$dp_1 = k \cos \varphi dF. \quad (2.5)$$

Проекции элементарной силы раздвигания частиц $d\bar{p}_1$ на направления нормали \bar{n}_0 к поверхности и касательной \bar{t}_0 к относительной траектории равны:

$$dp_1^n = k dF \cos^2 \varphi, \quad (2.6)$$

$$dp_1^t = k dF \sin \varphi \cos \varphi. \quad (2.7)$$

где dp_1^t – касательная проекция элементарной статической силы, Н; dp_1^n – нормальная проекция элементарной статической силы, Н.

Найдем длину лезвия одной стороны лапы:

$$l = \frac{b}{\sin\gamma}, \quad (2.8)$$

где γ – половина угла раствора лапы, град; b – половина ширины захвата, м.

Элемент площади поверхности лезвия выразится следующим образом:

$$dF = \frac{b}{\sin\gamma} \mu(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (2.9)$$

Подставив найденное значение элемента площади dF в формулы (2.6, 2.7), получим:

$$\begin{cases} dp_1^n = kb \frac{\cos^2\varphi}{\sin\gamma} \mu(\varepsilon) d\varepsilon \\ dp_1^t = kb \frac{\sin\varphi \cos\varphi}{\sin\gamma} \mu(\varepsilon) d\varepsilon \end{cases}. \quad (2.10)$$

Найдем проекцию элементарной силы $d\bar{p}_1$ на направления нормали n к лезвию, лежащей в плоскости дна борозды и образующей лезвия τ (рисунок 2.4). Получим на эти направления составляющие полной элементарной силы dN_1 и dT_1 :

$$\begin{cases} dN_1 = dp_1^n \sin\varepsilon + dp_1^t \sin\eta \cos\varepsilon \\ dT_1 = dp_1^t \cos\eta \end{cases}. \quad (2.11)$$

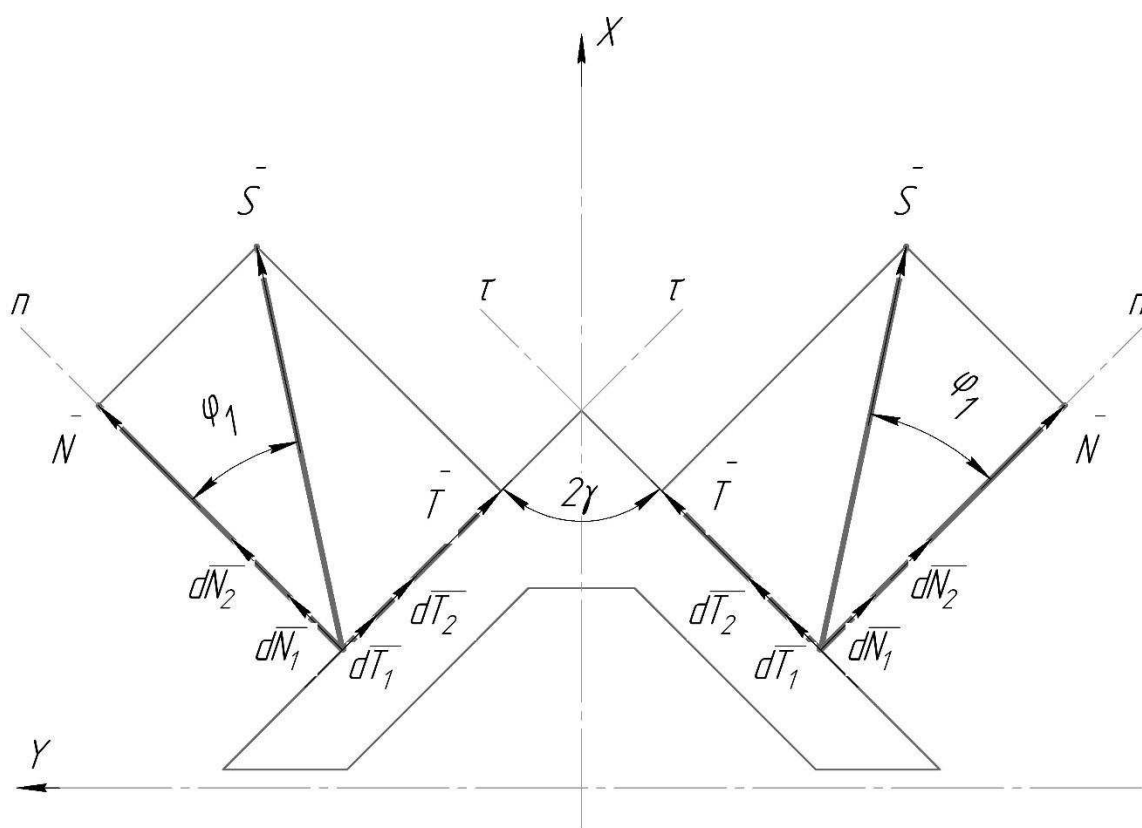
где dN_1 – нормальная проекция элементарной полной статической силы резания; dT_1 – тангенциальная проекция элементарной полной статической силы резания.

Найдем тангенс угла к касательной относительно траектории:

$$tg\eta = tg\gamma \cos\varepsilon. \quad (2.12)$$

Так как силы распределились симметрично на две поверхности лапы, рассмотрим правую часть, а затем удвоим найденные усилия. Подставляя в (2.11) значения dp_1^n и dp_1^t из (2.10) и угла η из уравнения (2.12), интегрируя полученные выражения в пределах от ε до $\frac{\pi}{2}$ и (удваивая для двух симметричных половин лезвия), получим значения N_1 и T_1 . Предполагаем, что поверхность лезвия имеет форму циклоиды, расположенной горизонтально (рисунок 2.2).

Вектор полного усилия резания \bar{S} разложим на нормальную \bar{N} и тангенциальную \bar{T} составляющие (рисунок 2.4).



dN_2 – нормальная проекция элементарной полной динамической силы резания; dT_2 – тангенциальная проекция элементарной полной динамической силы резания; φ_1 – приведённый угол трения лезвия о почву

Рисунок 2.4 – Схема расстановки сил, действующих на поверхность лезвия лапы

Найдем численные значения статических составляющих усилий N_1 и T_1 :

$$N_1 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dN_1 = 0,2k_0\rho ghb \frac{\cos^2\varphi}{\sin\gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin\varepsilon + f\sin\gamma \frac{\cos^2\varepsilon}{\sqrt{1 - \sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}} \right) \cdot 4r\cos(\varepsilon)d\varepsilon, \quad (2.13)$$

$$T_1 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dT_1 = 0,1k_0\rho ghb \frac{\sin 2\varphi}{\operatorname{tg} \gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{4\operatorname{rcos}(\varepsilon)}{\sqrt{1-\sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}} d\varepsilon, \quad (2.14)$$

где N_1 – нормальная проекция полной статической силы резания, Н; T_1 – тангенциальная проекция полной статической силы резания, Н; f – коэффициент трения почвы о поверхность лезвия.

Разделив T_1 на N_1 , найдем приведённый коэффициент трения лезвия о почву равный тангенсу угла φ_1 .

Из формул (2.13, 2.14) видно, что усилия T_1 и N_1 зависят от параметров лезвия: углов ε и γ , половины ширины захвата b , формы и размеров кривой ортогонального сечения лезвия $\mu = 4\operatorname{rcos}(\varepsilon)$, а также от коэффициента трения почвы о сталь f и свойств почвы.

Найдем силы динамического давления лезвия на почву. Применяем теорему об изменении количества движения к массе dm почвы:

$$dm \cdot (\bar{v} - \bar{v}_1) = d\bar{p}_2 \cdot dt, \quad (2.15)$$

где $d\bar{p}_2$ – элементарная сила динамического давления, действующая на массу почвы; dm – элементарная масса почвы; \bar{v}_1 – вектор начальной скорости частицы почвы; \bar{v} – вектор абсолютной скорости частицы; dt – элементарный временной отрезок.

Так как скорость частицы до соприкосновения с лезвием $\bar{v}_1 = 0$, то:

$$d\bar{p}_2 = \frac{dm}{dt} \bar{v}, \quad (2.16)$$

где $\frac{dm}{dt}$ – элементарная масса почвы, поступающая в единицу времени.

Ввиду малости элементарной площадки dF величина dm является бесконечно малой.

Проекции элементарной динамической силы $d\bar{p}_2$ (рисунок 2.5) на направление нормали \bar{n}_0 к поверхности и касательной \bar{t}_0 к относительной траектории движения частицы пласта будут равны:

$$dp_2^n = \frac{dm}{dt} v \cos\varphi, \quad (2.17)$$

$$dp_2^t = \frac{dm}{dt} v \sin\varphi, \quad (2.18)$$

где dp_2^n – элементарная нормальная сила динамического давления; dp_2^t – элементарная касательная сила динамического давления.

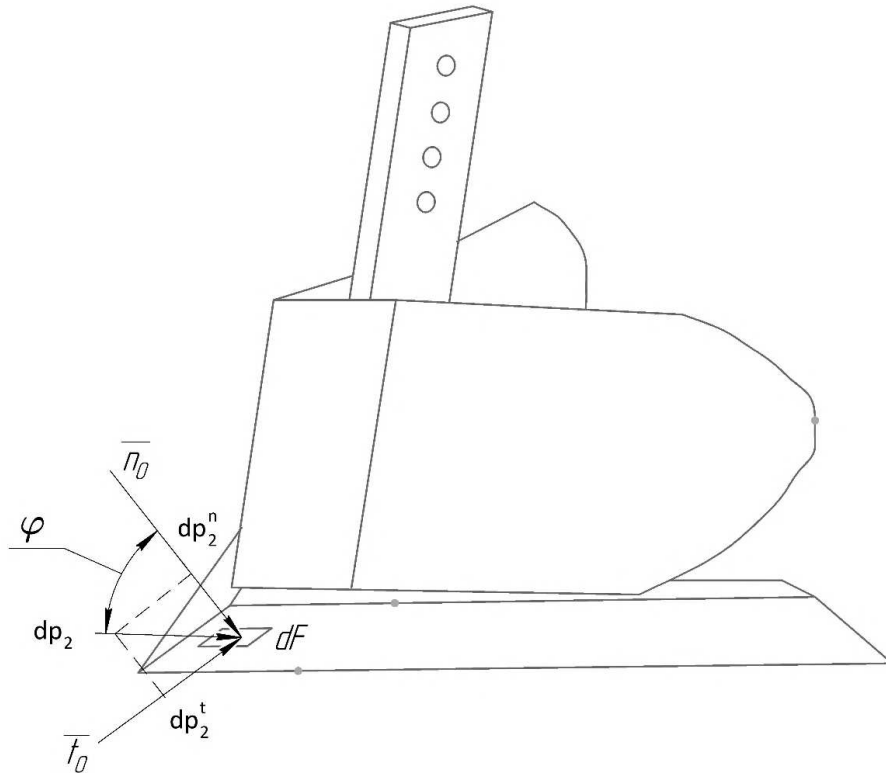


Рисунок 2.5 – Схема сил динамического давления лезвия на почву

Масса почвы, поступающая за время dt на элементарную площадку dF поверхности лезвия равна:

$$dm = \rho v_e \cdot \sin\gamma \cdot \sin\varepsilon \cdot dF dt, \quad (2.19)$$

где v_e – переносная скорость, м/с.

Переносная скорость равна [32]:

$$v_e = \frac{v_r}{(\cos\beta_1 - f \sin\beta_1)}, \quad (2.20)$$

где v_r – относительная скорость, м/с; f – коэффициент трения почвы о лезвие; β_1 – угол между касательной к относительной траектории движения пласта по лапе и горизонтальной осью, град (рисунок 2.6).

Угол β_1 находим из сферического треугольника на трёхгранном клине, представленном на рисунке п.1.1. (Приложение 1), тогда:

$$\sin\beta_1 = \sin\gamma \sin\varepsilon. \quad (2.21)$$

Найдем значение абсолютной скорости из схемы векторного треугольника (рисунок 2.6):

$$v = v_e \frac{\sin\gamma}{\cos\varphi} \sin\varepsilon. \quad (2.22)$$

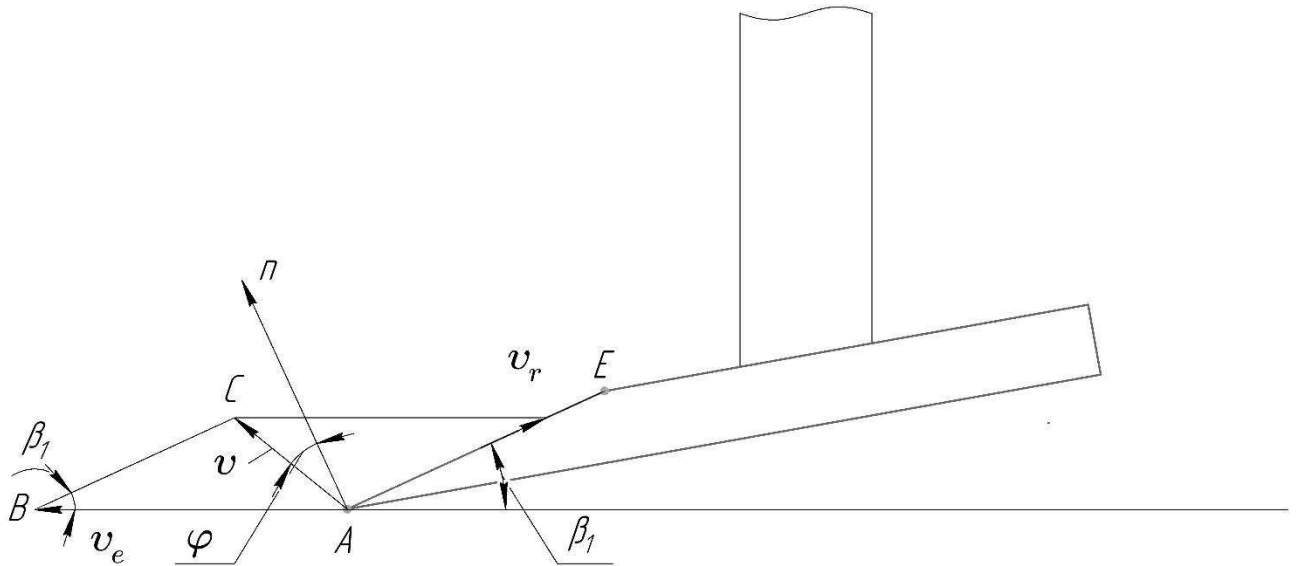


Рисунок 2.6 – Схема векторного треугольника скоростей движения почвы по лезвию

Подставляя в формулы (2.17, 2.18) значение $\frac{dm}{dt}$ из (2.19), $\sin\beta_1$ из (2.21) и значение абсолютной скорости (2.22), получим:

$$dp_2^n = \frac{\rho}{g} bv_e^2 \sin\gamma \cdot \sin^2\varepsilon \cdot 4\text{rcos}(\varepsilon)d\varepsilon, \quad (2.23)$$

$$dp_2^t = f \frac{\rho}{g} bv_e^2 \sin\gamma \cdot \sin^2\varepsilon \cdot 4\text{rcos}(\varepsilon)d\varepsilon. \quad (2.24)$$

Проецируя составляющие элементарной динамической силы давления dp_2^n и dp_2^t на направления нормали n и образующей τ лезвия по аналогии с (2.11), интегрируя эти выражения в пределах от ε до $\frac{\pi}{2}$ и удваивая, найдем силы N_2 и T_2 :

$$N_2 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dN_2 = 2 \frac{\rho}{g} bv_e^2 \sin\gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} (\sin\varepsilon + f \sin\gamma \frac{\cos^2\varepsilon}{\sqrt{1-\sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}}) 4\text{rcos}(\varepsilon) \cdot \sin^2\varepsilon d\varepsilon, \quad (2.25)$$

$$T_2 = \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} dT_2 = f \frac{\rho}{g} bv_e^2 \sin 2\gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2\varepsilon \cdot 4\text{rcos}(\varepsilon)}{\sqrt{1-\sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}} d\varepsilon, \quad (2.26)$$

где N_2 – нормальная проекция полной динамической силы резания, Н; T_2 – тангенциальная проекция полной динамической силы резания, Н.

Динамические усилия T_2 и N_2 зависят от углов ε и γ , формы и размеров кривой ортогонального сечения лезвия $\mu = 4\text{rcos}(\varepsilon)$, скорости движения лезвия v_e . При $\varepsilon \rightarrow \frac{\pi}{2}$ касательная и нормальная составляющие усилия резания стремятся к нулю, так как интервал интегрирования $(\frac{\pi}{2} - \varepsilon) \rightarrow 0$.

Составляющие полной силы давления при резании лезвием сухой почвы найдем по формулам:

$$\begin{cases} T = T_1 + T_2 \\ N = N_1 + N_2 \end{cases} \quad (2.27)$$

Рассмотрев одну сторону сопротивления лезвия лапы плуга, удвоим сопротивление и найдем S_x , спроецировав \bar{S} на ось x :

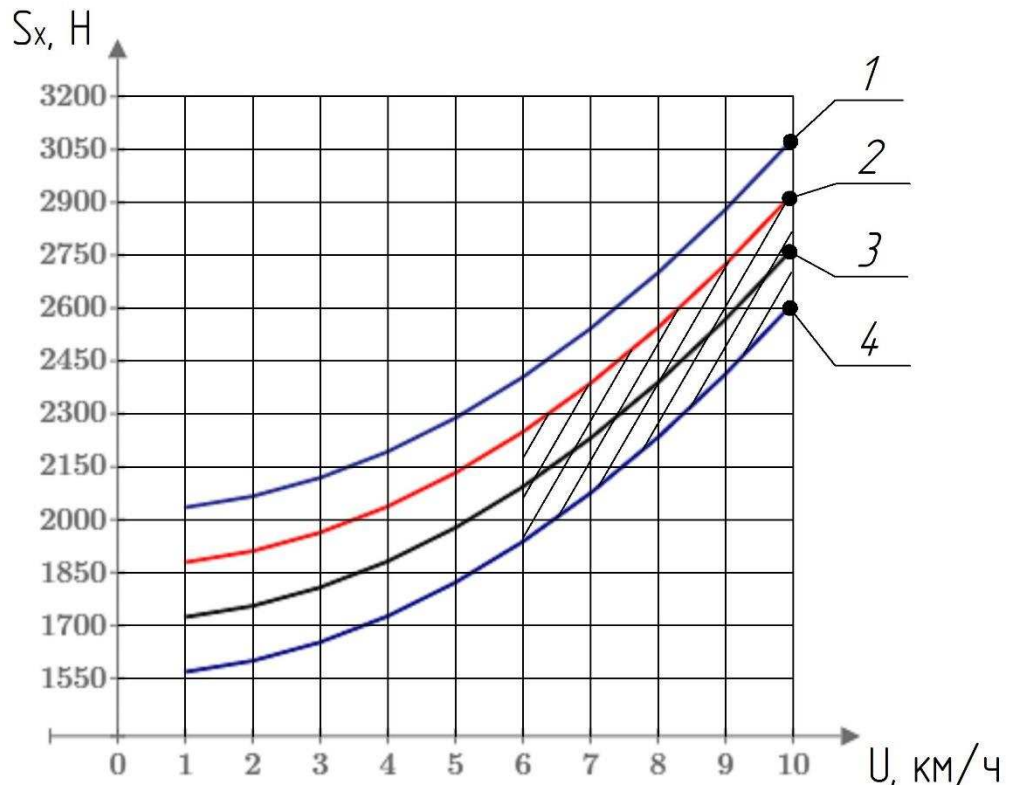
$$S_x = 2(T_1 + T_2)\cos\gamma + 2(N_1 + N_2)\sin\gamma, \quad (2.28)$$

Составляющая силы резания описывается в (2.28), подставив в это уравнение (2.13), (2.14), (2.25), (2.26) получим:

$$\begin{aligned}
S_x = & 2 \left(0,1k_0\rho ghb \frac{\sin 2\varphi}{\operatorname{tg} \gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{4\operatorname{rcos}(\varepsilon)}{\sqrt{1-\sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} d\varepsilon + \right. \\
& + f \frac{p}{g} b v_e^2 \sin 2\gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2 \varepsilon \cdot 4\operatorname{rcos}(\varepsilon)}{\sqrt{1-\sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} d\varepsilon \left. \right) \cos \gamma + 2 \left(0,2k_0\rho ghb \frac{\cos^2 \varphi}{\sin \gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin \varepsilon + \right. \right. \\
& \left. \left. + f \sin \gamma \frac{\cos^2 \varepsilon}{\sqrt{1-\sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} \right) 4\operatorname{rcos}(\varepsilon) d\varepsilon + 2 \frac{p}{g} b v_e^2 \sin \gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin \varepsilon + \right. \right. \\
& \left. \left. + f \sin \gamma \frac{\cos^2 \varepsilon}{\sqrt{1-\sin^2 \gamma \sin^2 \varepsilon}} \right) 4\operatorname{rcos}(\varepsilon) \cdot \sin^2 \varepsilon d\varepsilon \right). \quad (2.29)
\end{aligned}$$

Для определения зависимости силы резания от режимных и конструктивных параметров примем: $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$; $h = 0,18 \dots 0,27 \text{ м}$; $f = 0,15 \dots 0,60$; $2\gamma = 15 \dots 60 \text{ град}$; $b = 0,25 \text{ м}$; $v_e = 1 \dots 10, \text{ км/ч}$; $\varepsilon = 15^\circ = 0,262, \text{ рад}$; $g = 9,81, \text{ м/с}^2$; $r = 0,02 \text{ м}$.

Построим график зависимости силы резания от скорости движения и глубины обработки (рисунок 2.7).

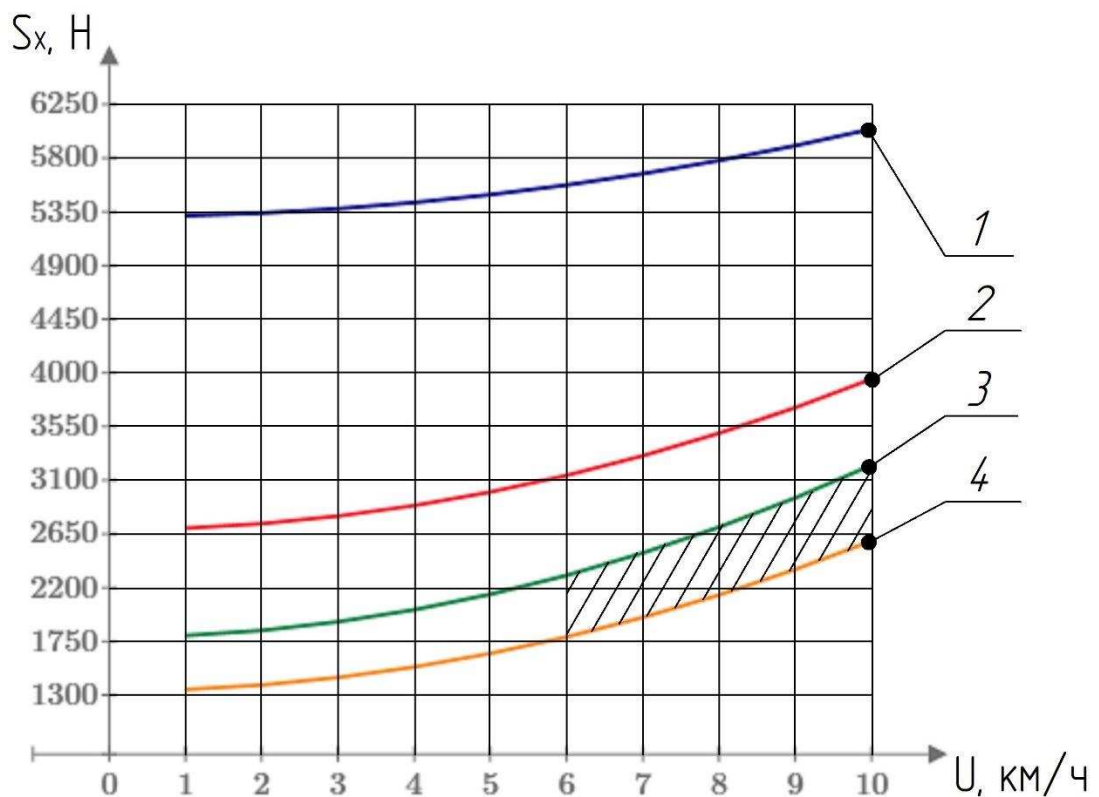


1 – $h = 0,27 \text{ м}$; 2 – $h = 0,24 \text{ м}$; 3 – $h = 0,21 \text{ м}$; 4 – $h = 0,18 \text{ м}$

Рисунок 2.7 – График зависимости силы резания от скорости движения и глубины обработки

Из графика (рисунок 2.7) видно, что с увеличением скорости и глубины обработки сила резания лапой пласта почвы увеличивается, причем зависимость нелинейна в среднем на каждые дополнительные 3 см глубины обработки сила резания увеличивается в среднем на 150 Н. Скорость движения сильно влияет на силу резания, но снижение ее приводит к уменьшению производительности и увеличению коэффициента буксования трактора, поэтому примем нижний предел для скорости движения в 6 км/ч, а верхний предел установлен, исходя из требований по обработке почв под зерновые культуры. Исходя из этого, рекомендуется принять заштрихованную область, лежащую в промежутке от 6 до 10 км/ч и принадлежащую диапазону глубины обработки от 18 до 24 см, с целью уменьшения силы резания. При скорости 6 км/ч сила резания будет лежать в интервале от 1900 до 2250 Н, а при 10 км/ч от 2600 до 2900 Н.

Построим график зависимости силы резания от скорости движения и угла раствора лапы (рисунок 2.8).



$$1 - 2\gamma = 15^\circ ; 2 - 2\gamma = 30^\circ ; 3 - 2\gamma = 45^\circ ; 4 - 2\gamma = 60^\circ$$

Рисунок 2.8 – График зависимости силы резания от скорости движения и угла раствора лапы

Из графика (рисунок 2.8) видно, что снижение силы резания происходит с увеличением угла раствора лапы, причем кривая усилия имеет нелинейную форму. Наиболее низкое усилие резания находится при угле раствора лапы 60 градусов и лежит в промежутке от 1350 до 2250 Н. Исходя из этого, рекомендуется принять заштрихованную область, лежащую в диапазоне угла раствора лапы от 45 до 60 градусов. При скорости 6 км/ч усилие резания изменялось от 1750 до 2250 Н, а при скорости 10 км/ч от 2600 до 3150 Н.

Построим график зависимости силы резания от скорости движения и коэффициента трения (рисунок 2.9).

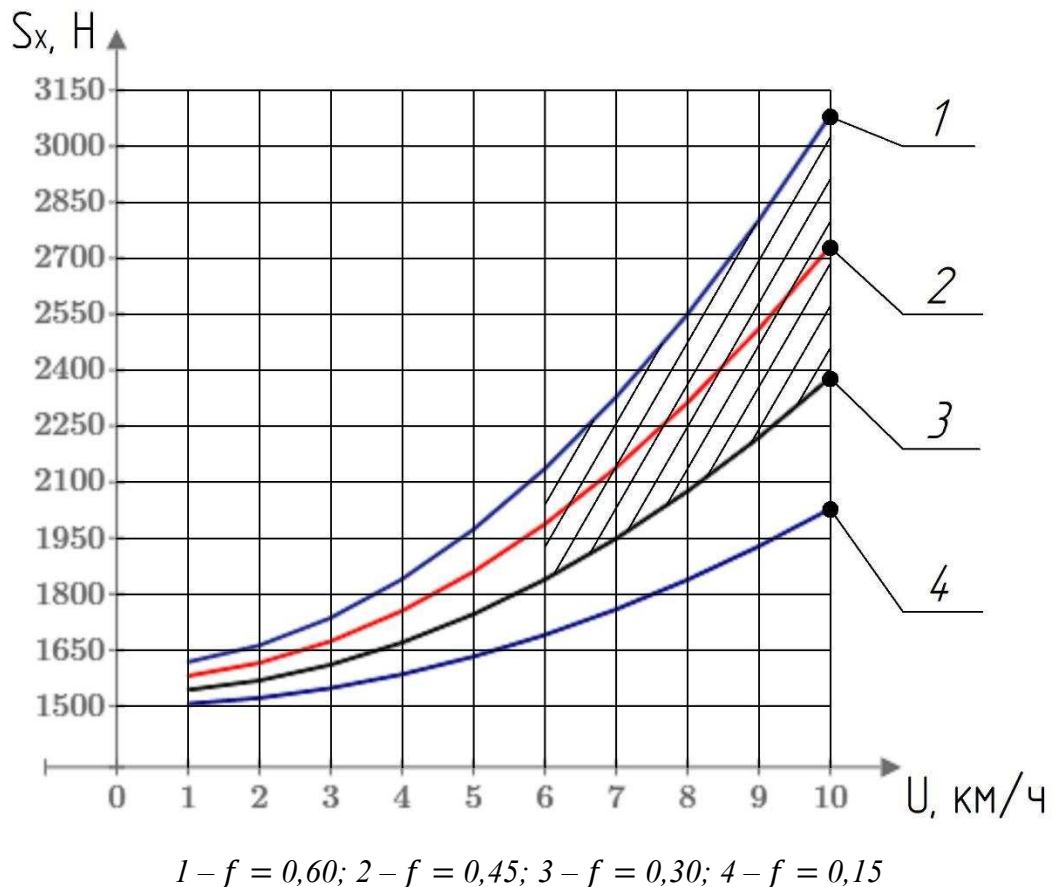


Рисунок 2.9 – График зависимости силы резания от скорости движения и коэффициента трения

На графике (рисунок 2.9) видно, что снижение коэффициента трения напрямую влияет на снижение усилия резания, причем при повышении скорости движения расхождение заметно увеличивается. Так, при 6 км/ч расхождение в среднем составляло 150 Н между ближайшими кривыми, а при 9 км/ч составило 300 Н. Рекоменду-

ется применять материалы с наименьшим коэффициентом трения при взаимодействии с почвой. Рекомендуем принять заштрихованную область, лежащую в пределах изменения коэффициента трения сталь-почва от 0,3 до 0,6. Принятый диапазон значений коэффициента трения принадлежит паре трения черноземных и глинистых почв со сталью. При скорости 6 км/ч усилие резания изменялось в пределах от 1800 до 2100 Н, а при 10 км/ч – от 2400 до 3100 Н.

Найдем усилия, возникающие при движении пласта почвы по лапе. Силы, действующие на почвенный пласт со стороны лапы, можно подразделить на силы статического давления, производящие деформацию пласта, и на силы динамического давления, расходуемые на сообщение скорости массе пласта. Движение частиц почвы при вступлении на лапу рассматриваем как непрерывный удар частиц о плоскость лапы. Для определения возникающей при этом силы динамического давления лапы $\overline{F}_{\text{лп}}$ воспользуемся теоремой об изменении количества движения для элементарной массы dm пласта получим:

$$\overline{F}_{\text{лп}} = \frac{dm}{dt} \overline{v}, \quad (2.30)$$

где \overline{v} – вектор абсолютной скорости частицы.

Следовательно, сила динамического давления лапы на пласт $F_{\text{лп}}$ совпадает по направлению с абсолютной скоростью частицы и лежит в плоскости, проходящей через направление движения корпуса \overline{v}_e и касательную к относительной траектории в ее начальной точке \overline{v}_r .

Проецируя на ось x (2.30), получим:

$$F_{\text{лп}x} = \frac{dm}{dt} v_x, \quad (2.31)$$

где $F_{\text{лп}x}$ – проекция на ось x силы динамического давления лапы, Н; v_x – проекция абсолютной скорости на ось x .

Масса почвы, поступающая в единицу времени, равна:

$$\frac{dm}{dt} = ab\rho \cdot \frac{dx}{dt} = ab\rho v_e, \quad (2.32)$$

где a – толщина пласта, м.

Определим абсолютную скорость частицы пласта при движении по лапе, а также проекции скорости на оси координат. Переносная скорость частицы – скорость плуга v_e – является величиной заданной. Относительная скорость не равна переносной, так как при вступлении на лапу происходит сжатие пласта. Степень этого сжатия можно оценить коэффициентом $\psi = \frac{v_r}{v_e}$. Следовательно:

$$v_r = \psi v_e. \quad (2.33)$$

Абсолютная скорость частицы, как геометрическая сумма переносной и относительной скоростей, будет лежать в плоскости, не проходящей через нормаль к поверхности. Величина абсолютной скорости, как длина диагонали параллелограмма, построенного на векторах \bar{v}_e и \bar{v}_r , (см. рисунок 2.6) угол между которыми $(v_e, \wedge v_r) = \pi - \beta_1$, будет равна:

$$v = v_e \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \beta_1}. \quad (2.34)$$

Проектируя абсолютную скорость на ось x , найдем:

$$v_x = v_e (1 - \psi \cos \beta_1). \quad (2.35)$$

Подставляя в формулы (2.30) и (2.31) значение $\frac{dm}{dt}$ из (2.32), а также v, v_x из формул (2.34) и (2.35), получим:

$$F_{\text{лп}} = ab\rho v_e^2 \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \beta_1}, \quad (2.36)$$

$$F_{\text{лп}x} = \frac{ab\rho}{g} v_e^2 (1 - \psi \cos \beta_1). \quad (2.37)$$

Примем нормальную проекцию скорости из трёхгранного клина, представленного на рисунке п.1.1. (Приложение 1):

$$v_n = v_e \sin \varepsilon \sin \gamma. \quad (2.38)$$

Аналогичным образом находим проекции силы $\overline{F_{\text{лп}}}$ на направления нормали к поверхности \overline{n}_0 . Из формул (2.32) и (2.38) получим:

$$F_{\text{лпн}} = \frac{ab\rho}{g} v_e^2 \sin \varepsilon \sin \gamma. \quad (2.39)$$

Нормальная составляющая $F_{\text{лпн}}$ динамического давления, прижимающего пласт к лапе, создаст силу трения T_F :

$$T_F = f \frac{ab\rho}{g} v_e^2 \sin \varepsilon \sin \gamma. \quad (2.40)$$

Найдем усилия, производящие деформацию пласта при его вступлении на лапу (статическое давление лапы на пласт). Рассматриваем лапу как плоский клин. При перемещении клина за время t на расстояние $BA = x$ (рисунок 2.10).

Частица почвы получит в абсолютном движении перемещение $BC = \delta$,

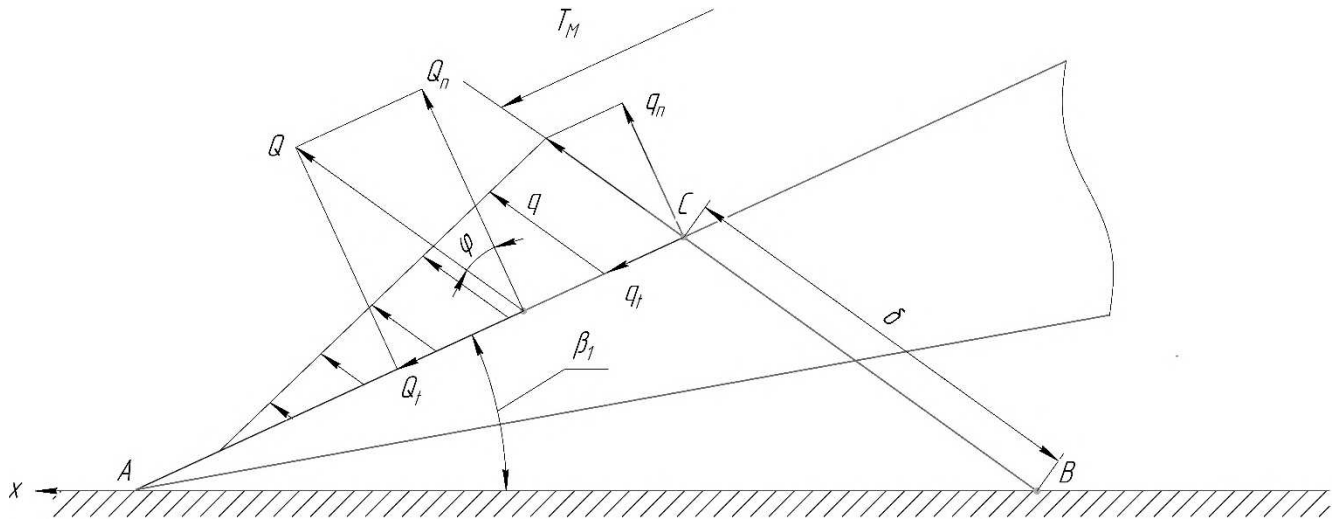
$$\delta = vt = v_e \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \beta_1} \cdot t = \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \beta_1} \cdot x, \quad (2.41)$$

где δ – абсолютное перемещение частицы, м; ψ – коэффициента сжатия пласта; x – перемещение клина, м.

А в относительном движении – перемещение $AC = s$:

$$s = v_r t = \psi v_e t = \psi x. \quad (2.42)$$

Полное давление лапы на почву в какой-либо точке поверхности будет состоять из нормального q_n и тангенциального q_t распределённых давлений, направленных противоположно относительной скорости (рисунок 2.6). Кроме того, на пласт дополнительно передается сжимающая сила T_m , возникающая вследствие трения пласта об отвал и веса пласта.



Q_n – сила нормального статического давления веса элемента пласта; Q_t – сила трения элемента пласта; Q – полная сила давления лапы на пласт; T_m – полная сжимающая сила; q – полное распределенное давление лапы на почву; q_n – нормальная составляющая распределенного давления лапы на почву; q_t – тангенциальная составляющая распределенного давления лапы на почву

Рисунок 2.10 – Схема усилий, деформирующих пласт

Так как нас интересует тяговое сопротивление, представляющее собой горизонтальную составляющую усилия, то из формул (2.41, 2.42) величина деформации сжатия почвы в абсолютном направлении движения δ , а в относительном направлении движения s пропорциональна перемещению клина x и зависит от параметров лезвия лапы и коэффициента сжатия пласта ψ . В дальнейшем будем рассматривать относительное перемещение пласта по поверхности s как переменную деформацию пласта.

Вступающая на лапу часть пласта будет рассматриваться как консольная балка, нагруженная распределёнными давлениями q_n и q_t . Напряжения, возникающие в «опасном сечении» пласта (сечении, проходящем через лезвие лапы), могут быть найдены по известным формулам сопротивления материалов, если заданы действующие силы (зависимость напряжения q от переменной деформации пласта s), а также размеры сечения пласта a и b , угол η , коэффициент трения f почвы о лапу.

Если считать распределенное давление q_n пропорциональным деформации:

$$q_n = ks, \quad (2.43)$$

где k – нормальное давление, Па; s – переменная деформация пласта, м.

Не учитывая распределенного сжимающего давления q_t и усилия T_m , максимальный изгибающий момент будет равен:

$$M_{\text{изг}} = \frac{1}{3} k s^3. \quad (2.44)$$

Так как

$$M_{\text{изг}} = \sigma W, \quad (2.45)$$

где σ – напряжение растяжения и сжатия, возникающие при изгибе, Па; W – момент сопротивления сечения пласта, м³.

Найдем длину глыб из (2.41), (2.42):

$$s = L = \sqrt[3]{\frac{3}{k} W \cdot \sigma_B}. \quad (2.46)$$

Длина глыб возрастает пропорционально корню кубическому из напряжения σ_B . Данному размеру L глыбы соответствует определенная величина максимальной деформации δ_{max} пласта и максимальное перемещение x_{max} плуга.

Из соотношений (2.41) и (2.42) находим:

$$\begin{cases} \delta_{\text{max}} = \frac{1}{\psi} \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \beta_1} \cdot L; \\ x_{\text{max}} = \frac{1}{\psi} L. \end{cases} \quad (2.47)$$

Зная длину глыбы L , можно определить время t_r , в течение которого происходит образование глыб, тогда:

$$t_r = \frac{L}{v_r} = \frac{L}{\psi v_e}. \quad (2.48)$$

Найдем силы статического давления лапы на пласт. Примем нормальную составляющую распределенного давления лапы на почву q_n , возникающую при сжатии почвы лапой, пропорциональной деформации s . Тогда сила нормального

статического давления Q_n , и сила трения Q_t , действующие на пласт, выразятся формулами:

$$Q_n = ks^2, \quad (2.49)$$

$$Q_t = fks^2. \quad (2.50)$$

Полная сила давления лапы на пласт лежит в плоскости, проходящей через нормаль к поверхности и касательную к относительной траектории, отклоняясь на угол трения от нормали:

$$Q = \sqrt{Q_n^2 + Q_t^2} = k\sqrt{1 + f^2} \cdot s^2. \quad (2.51)$$

Величина s при работе плуга изменяется в пределах $0 \leq s \leq L$, что является одной из причин изменения тягового сопротивления корпуса. Это изменение обусловлено самим технологическим процессом работы плуга и имеет место даже при идеальных условиях работы: при однородной почве, равномерном и устойчивом ходе плуга и т.п.

Так как расстояние s является функцией времени, то

$$s = v_r t = \psi v_e t, \quad (2.52)$$

Силы Q_n , Q_t и Q также являются функцией времени:

$$\begin{cases} Q_n = k\psi^2 v_e^2 \cdot t^2 \\ Q_t = kf\psi^2 v_e^2 \cdot t^2 \end{cases} \quad (2.53)$$

$$Q = k\sqrt{1 + f^2} \psi^2 v_e^2 \cdot t^2, \quad (2.54)$$

где t – время, отсчитываемое от начала цикла образования глыбы, с.

Максимальное значение сил Q_n , Q_t и Q равны:

$$\begin{cases} Q_n = kL^2 \\ Q_t = fkL^2 \end{cases} \quad (2.55)$$

$$Q = k\sqrt{1 + f^2} \cdot L^2. \quad (2.56)$$

Решая треугольник (Приложение 1), выразим углы ε' и γ' через углы установки лапы ε и γ , угол трения φ и угол η :

$$\begin{cases} \cos\varepsilon' = \cos\varepsilon \cos\varphi - \sin\varepsilon \sin\varphi \sin\eta \\ \gamma' = \gamma + \operatorname{arctg} \left[\frac{\cos\eta}{\frac{\sin\varepsilon}{\operatorname{tg}\varphi} + \cos\varepsilon \sin\eta} \right] \end{cases} . \quad (2.57)$$

После этого спроецируем силу Q на ось x и определим ее по формуле:

$$Q_x = Q \sin\varepsilon' \sin\gamma', \quad (2.58)$$

где Q_x – проекция на ось x полной силы давления лапы на пласт, Н.

Повторно спроецируем (рисунок 2.10), найдем нормальную и касательную составляющие силы Q_x :

$$Q_{nx} = Q_n \sin\varepsilon \sin\gamma; \quad (2.59)$$

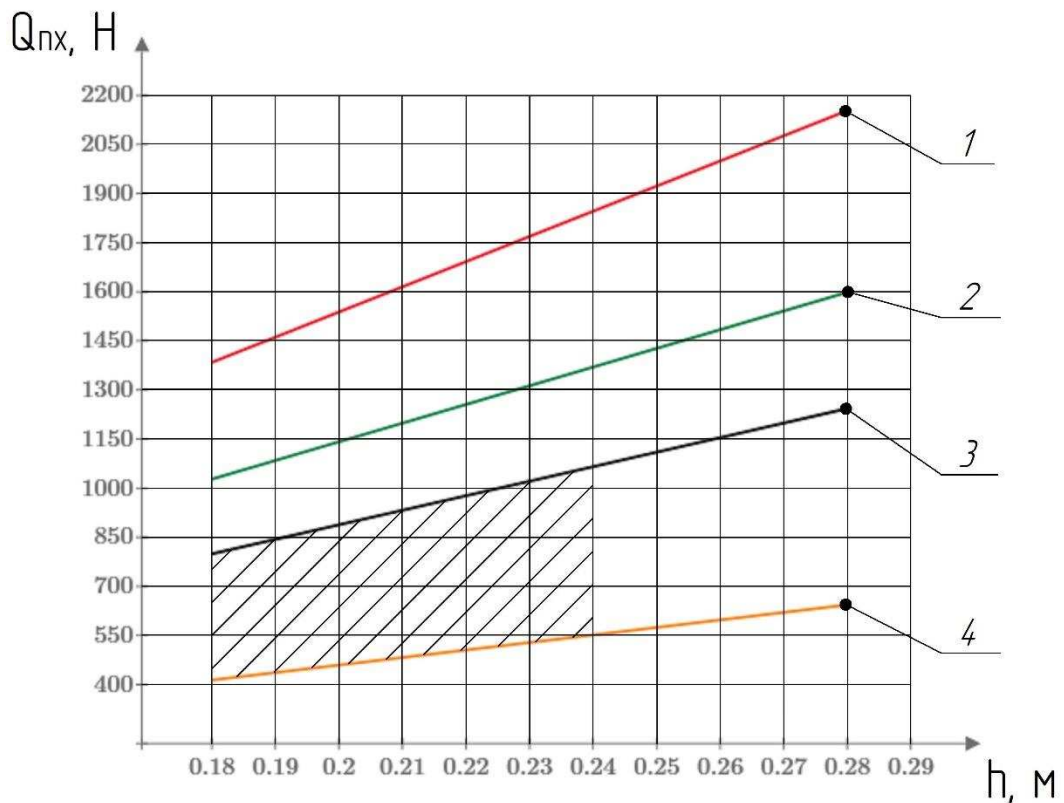
$$Q_{tx} = Q_t \cos\beta_1. \quad (2.60)$$

где Q_{tx} – тангенциальная составляющая проекция на ось x полной силы давления лапы на пласт, Н.

Усилие на деформацию почвы лапой описывается уравнением (2.59) подставим (2.55), (2.46) и (2.3) получим:

$$Q_{nx} = 0,1k_0\rho ghs^2 \cdot \sin\varepsilon \sin\gamma. \quad (2.61)$$

Для определения зависимости усилия Q_{nx} от конструктивных параметров примем: $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$; $h = 0,18 \dots 0,27 \text{ м}$; $f = 0,4$; $2\gamma = 15 \dots 60 \text{ град}$; $b = 0,25 \text{ м}$; $\varepsilon = 15^\circ \dots 60^\circ = 0,262 \dots 1,047 \text{ рад}$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $s = 0,1 \text{ м}$. Построим график зависимости усилия Q_{nx} от глубины обработки и угла заточки лезвия лапы (рисунок 2.11).

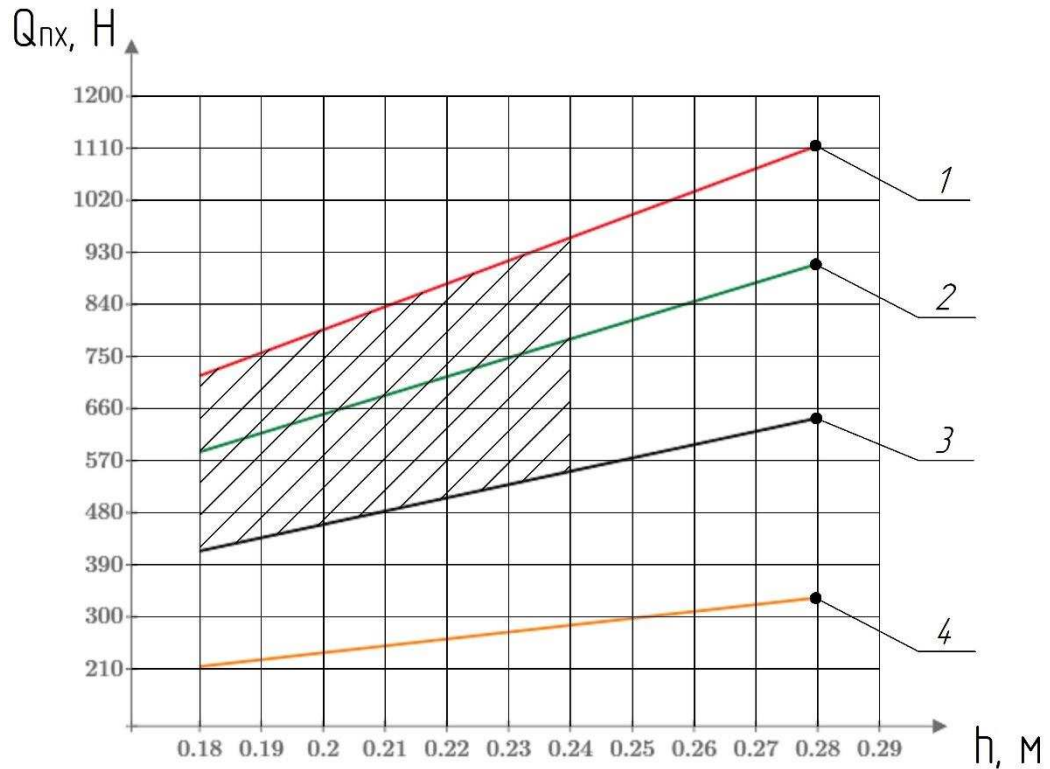


$$1 - \varepsilon = 60^\circ ; 2 - \varepsilon = 45^\circ ; 3 - \varepsilon = 30^\circ ; 4 - \varepsilon = 15^\circ$$

Рисунок 2.11 – График зависимости усилия Q_{nx} от глубины обработки и угла заточки лезвия лапы

Из графика (рисунок 2.11) видно, что рост усилия деформации почвы происходит с увеличением угла заточки лезвия лапы. При этом увеличение усилия деформации происходит неравномерно, наибольшее расхождение между кривыми составляет 500 Н и наблюдается между линиями 3 и 4. Более острое лезвие снижает усилие, но в то же время сильно заостренное лезвие склонно к выкрашиванию и быстрому износу, поэтому рекомендуется принимать угол заточки от 15 до 30 градусов. Рекомендуем заштрихованную область усилий деформации, находящуюся в интервале глубины обработки почвы от 18 до 24 см. Этот диапазон задается из условия снижения усилий деформации. При глубине 18 см усилие деформации находилось в интервале от 400 до 800 Н, а при 24 см приняло интервал от 500 до 900 Н.

Построим график зависимости усилия Q_{nx} от глубины обработки и угла раствора лапы (рисунок 2.12). Рекомендуем область режимных и конструктивных параметров будем обозначать штриховкой.



$$1 - 2\gamma = 60^\circ ; 2 - 2\gamma = 45^\circ ; 3 - 2\gamma = 30^\circ ; 4 - 2\gamma = 15^\circ$$

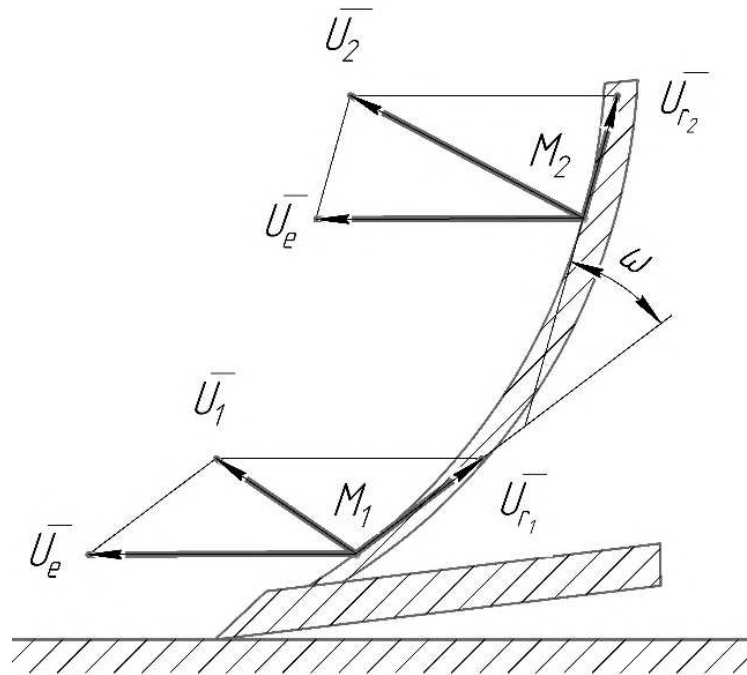
Рисунок 2.12 – График зависимости усилия Q_{nx} от глубины обработки и угла раствора лапы

Проанализировав график (рисунок 2.12) видно, что увеличение угла раствора лапы на 15 градусов приводит к увеличению усилия деформации в среднем на 200 Н. При угле раствора лапы 30 градусов и менее с сохранением ширины захвата происходит значительное удлинение режущей поверхности лезвия лапы, поэтому для снижения усилия следует принимать угол раствора лапы в диапазоне от 30 до 60 градусов. Рекомендуем заштрихованную область усилий деформации почвы, лежащую в пределах от 18 до 24 см глубины обработки почвы. Усилие деформации при глубине обработки 18 см будет находиться в интервале от 400 до 700 Н, а при 24 см от 500 до 900 Н.

Найдем усилие, действующее на пласт при движении по отвалу, изменяющее абсолютную скорость частиц пласта. Ранее было установлено, что переносную и относительную скорость частицы при движении ее по поверхности можно считать постоянными по величине. Абсолютная скорость частиц пласта при движении

изменяется за счет изменения угла между вектором относительной скорости и направлением движения корпуса (вектором переносной скорости).

Элемент пласта массы m прошел по отвалу некоторое расстояние. При этом вектор его абсолютной скорости изменился от значения \bar{v}_1 к значению \bar{v}_2 , а вектор относительной скорости повернулся на угол ω (рисунок 2.13).



ω – угол между касательными к траектории движения пласта по отвалу

Рисунок 2.13 – Схема движения пласта по отвалу

По теореме об изменении количества движения имеем:

$$\bar{F}_{\text{ср0}} \cdot \Delta t = m(\bar{v}_2 - \bar{v}_1), \quad (2.62)$$

где $\bar{F}_{\text{ср0}}$ – вектор среднего усилия, возникающего при движении пласта по отвалу, Н;
 Δt – приращение времени движения пласта по отвалу, с.

Учитывая, что вектор абсолютной скорости в конце и начале отвала можно представить как:

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_e + \bar{v}_{r2}; \bar{v}_1 = \bar{v}_e + \bar{v}_{r1}, \quad (2.63)$$

можно написать

$$\overline{F}_{\text{срo}} = m \frac{\overline{v}_{r2} - \overline{v}_{r1}}{\Delta t} = m \frac{\Delta \overline{v}_r}{\Delta t}, \quad (2.64)$$

где \overline{v}_{r1} – вектор относительной скорости пласта в начале отвала; \overline{v}_{r2} – вектор относительной скорости пласта в конце отвала.

Принимая что $\Delta t \rightarrow 0$, получим:

$$\overline{F}_0 = m \frac{d\overline{v}_r}{dt}, \quad (2.65)$$

где \overline{F}_0 – вектор силы прижимающий пласт к отвалу.

Так как вектор относительной скорости сохраняет свою величину и изменяется только по направлению, то вектор относительного ускорения \overline{a}_r состоит из одной нормальной составляющей $\overline{a}_r^n = \frac{d\overline{v}_r}{dt}$, поэтому:

$$\overline{F}_0 = m \overline{a}_r^n, \quad (2.66)$$

где \overline{a}_r^n – нормальная составляющая вектора относительное ускорение точки.

Таким образом, сила, вызывающая изменение абсолютной скорости частиц, направлена по главной нормали относительной траектории движения частиц почвы.

Элементарную силу dF_0 , соответствующую элементу пласта dm , раскладываем в нормальной плоскости траектории по двум направлениям – по нормали к поверхности и по нормали к кривой, лежащей в касательной плоскости к поверхности.

Касательная к поверхности, составляющая dF_{op} элементарной силы dF_0 равна по величине и противоположна по направлению соответствующей силе инерции пласта.

Следовательно, по величине:

$$dF_{op} = dm \cdot v_r^2 c_r = dm v_r^2 \frac{d\eta}{ds}, \quad (2.67)$$

где dF_{op} – касательная составляющая элементарной силы прижима пласта к отвалу; $c_r = \frac{d\eta}{dS}$ – геодезическая кривизна траектории; dS – элементарное расстояние траектории движения частицы пласта.

Учитывая, что

$$dm = \frac{ab\rho}{g} dS. \quad (2.68)$$

Подставим в (2.66) значение dm из (2.67) и получим:

$$dF_{op} = \frac{\rho}{g} abv_r^2 \cdot \frac{d\eta}{dS} dS. \quad (2.69)$$

Нормальная к поверхности составляющая элементарной силы dF_o , прижимающая пласт к отвалу, выразится:

$$dF_{on} = \frac{\rho}{g} abv_r^2 \cdot \frac{d\theta}{dS} dS, \quad (2.70)$$

где dF_{on} – нормальная составляющая элементарной силы прижима пласта к отвалу.

Угол $d\theta$ будем называть элементарным «углом охвата» пласта отвалом, который выразится:

$$d\theta = c_n dS, \quad (2.71)$$

где $c_n = \frac{d\theta}{dS}$ – нормальная составляющая кривизны траектории.

Значение угла охвата пласта отвалом θ для конечного участка траектории выразится следующей формулой:

$$\theta = \int_{S_1}^{S_2} c_n dS, \quad (2.72)$$

где S_1 – начальная точка на траектории движения частицы пласта; S_2 – конечная точка на траектории движения частицы пласта.

Модуль силы $d\bar{F}_o = d\bar{F}_{op} + d\bar{F}_{on}$ можно записать в виде:

$$dF_0 = dm \cdot v_r^2 c = \frac{\rho}{g} abv_r^2 \frac{d\omega}{dS} dS, \quad (2.73)$$

где $c = \sqrt{c_r^2 + c_n^2} = \frac{d\omega}{dS}$ – полная кривизна траектории; $d\omega$ – элементарный угол между касательными к траектории движения частицы пласта по отвалу.

Найдем силу нормального давления пласта на отвал, возникающую вследствие связности пласта. Форма отвальной поверхности накладывает определенное ограничение на относительную траекторию частицы пласта – это должна быть кривая, лежащая на поверхности отвала. Если при этом форма относительной траектории известна, то этим определена не только геодезическая, но и нормальная кривизна кривой.

Определим по заданной форме упругой линии (траектории частицы пласта) деформацию и соответствующую этой деформации распределённую нагрузку.

Будем считать, что нормальная составляющая к кривизне траектории известна в каждой ее точке, тогда:

$$c_n = c_n(S). \quad (2.74)$$

Кроме того, известен материал пласта (модуль нормальной упругости E , Па) и форма поперечного сечения пласта (момент инерции сечения $I = \frac{ba^3}{12}$, м⁴).

Между нормалью к кривизне, изгибающим моментом и жесткостью балки EI существует зависимость, которую будем считать с определенной степенью точности применимой и в данном случае по отношению к нормальной кривизне пласта, тогда:

$$M_{\text{изг}} = c_n \cdot EI. \quad (2.75)$$

где $M_{\text{изг}}$ – изгибающий момент, Н · м.

Дифференцируя это уравнение дважды по расстоянию траектории движения пласта S , получим распределенную нагрузку, обусловленную формой поверхности как функцию от S . Тогда распределённая нагрузка, обусловленная формой поверхности, имеет вид:

$$\frac{d^2 M_{\text{изг}}}{dS^2} = q = EI \frac{d^2 c_n}{dS^2} = EI \frac{d^3 \theta}{dS^3}. \quad (2.76)$$

Следовательно, элементарное дополнительное нормальное давление на отвал от сил упругости пласта $dQ_{\text{дпн}}$, приходящееся на данный элемент, будет равно:

$$dQ_{\text{дпн}} = EI \frac{d^3 \theta}{dS^3} dS. \quad (2.77)$$

Это усилие может быть мало в тех случаях, когда пласт после вступления на отвал теряет способность сопротивляться изгибу. Даже небольшое увеличение нормального давления пласта на отвал приводит к значительному возрастанию сил трения, следовательно, усилий, сжимающих пласт.

Найдем полное сжимающее пласт усилие. Как было показано ранее, элемент пласта элементарной длиной прижимается к отвалу направленными по нормали к поверхности составляющими от элементарных сил: динамического (скоростного) давления прижима пласта к отвалу $dF_{\text{он}}$, статического давления веса элемента пласта dQ_n , дополнительного давления от веса за счет изгиба пласта dN_n и нормального давления за счет «упругости» пласта $dQ_{\text{дпн}}$. Таким образом, элементарное результирующее нормальное давление, прижимающее выделенный элемент к поверхности, равно:

$$dN_{\text{пл}} = dF_{\text{он}} + dQ_n + dN_n + dQ_{\text{дпн}}. \quad (2.78)$$

Все эти силы являются функциями точки на кривой (параметра S и θ). Принимаем в качестве основного параметра угол θ , тогда можем записать:

$$dN_{\text{пл}} = \varphi(\theta) d\theta. \quad (2.79)$$

Элементарное результирующее нормальное давление, прижимающее выделенный элемент к поверхности $dN_{\text{пл}}$, вызовет элементарную силу трения пласта об отвал:

$$dT_{\text{пл}} = f dN_{\text{пл}} = f \varphi(\theta) d\theta. \quad (2.80)$$

Сила трения пласта об отвал $T_{пл}$ (рисунок 2.14), действующая в начале сечения выделенного элемента пласта и сила $T_{плк}$, действующая в конце сечениях выделенного элемента, направлены по касательным к относительной траектории. В пределе (при $dS \rightarrow 0$) силы трения лежат в соприкасающейся плоскости с траекторией. Складываваясь, они дают равнодействующую, направленную по главной нормали к кривой, проекция которой на нормаль к поверхности будет равна:

$$dN_{плр} = T_{пл}d\theta = T_{пл}c_n dS. \quad (2.81)$$

Элементарная сила $dN_{плр}$, прижимающая выделенный элемент пласта к отвалу, создает дополнительную силу трения:

$$dT_{плд} = f dN_{плр} = f T_{пл} d\theta. \quad (2.82)$$

Кроме того, элементарное полное сжимающее пласт усилие возрастет за счет собственного веса элемента на величину:

$$dQ_T = ab\rho g dh = \psi(\theta)d\theta. \quad (2.83)$$

Таким образом, полное приращение сжимающего пласт усилия, соответствующее выбранному элементу, будет:

$$dT_{пл} = dT_{плк} + dT_{плд} + dQ_T = f\varphi(\theta)d\theta + fT_{пл}d\theta + \psi(\theta)d\theta, \quad (2.84)$$

заменяя

$$f\varphi(\theta) + \psi(\theta) = f\omega(\theta), \quad (2.85)$$

и преобразовывая, получим

$$\frac{dT}{d\theta} - fT_{пл} = f\omega(\theta). \quad (2.86)$$

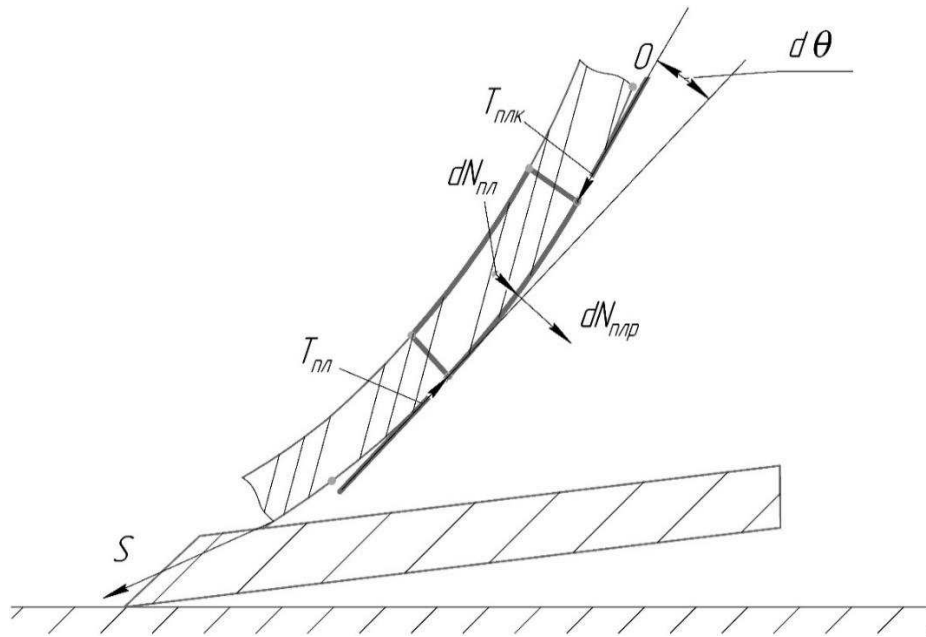


Рисунок 2.14 – Схема расстановки сжимающих усилий пласта

Общее решение полученного дифференциального уравнения имеет вид:

$$T_{пл} = f e^{f\theta} \int e^{-f\theta} \omega(\theta) d\theta. \quad (2.87)$$

Так как функция $\omega(\theta)$ будет при практических расчетах задана графически, то применение формулы (2.87) сведется к графическому интегрированию.

Пусть

$$\int e^{-f\theta} \omega(\theta) d\theta = q_p + C, \quad (2.88)$$

где q_p – распределенная нагрузка, прижимающая пласт к отвалу, Н/м.

Найдем распределённую нагрузку, прижимающую пласт к отвалу:

$$q_p = \frac{T_{ср}}{l_{отв}}, \quad (2.89)$$

где $l_{отв}$ – длина отвала, м; $T_{ср}$ – средняя величина сжимающего усилия, Н.

Средняя величина сжимающего усилия на поверхности отвала, обусловлена весом части пласта, находящегося на отвале, тогда:

$$T_{ср} = ab\rho gh_{к}, \quad (2.90)$$

где h_k – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в начальной точке траектории на отвале и в месте схода пласта с отвала, м.

Найдем длину отвала:

$$l_{\text{отв}} = R_{\text{кр}}\vartheta, \quad (2.91)$$

где $R_{\text{кр}} = \frac{1}{c}$ – радиус кривизны траектории, м; ϑ – центральный угол дуги траектории, град.

Подставив в (2.89) уравнения (2.90), (2.91) получим:

$$q_p = \frac{ab\rho gh_k}{R_{\text{кр}}\vartheta}. \quad (2.92)$$

Если первообразная q_p , которая при $\theta = 0$ имеет значение начальной распределенной нагрузки, прижимающей пласт к отвалу $q_{p0} = 0$.

Тогда

$$T_{\text{пл}} = f e^{f\theta} (q_p + C). \quad (2.93)$$

Пологая при $\theta = 0$, $T_{\text{пл}} = T_0$, получим $C = \frac{T_0}{f}$ и

$$T_{\text{пл}} = (T_0 + f q_p) e^{f\theta}, \quad (2.94)$$

где T_0 – начальная величина сжимающего усилия, Н.

Начальная величина сжимающего усилия в том месте, где пласт сходит с поверхности отвала, обусловлена весом части пласта, находящейся вне отвала. Величину этого усилия найдем из Приложения 1 (п.1.6.), тогда формула примет вид:

$$T_0 = ab\rho gh_0, \quad (2.95)$$

где h_0 – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в наивысшей точке траектории вне отвала и в месте схода пласта с отвала, м.

Построим график зависимости сжимающего усилия пласта $T_{пл}$ от угла охвата пласта θ (рисунок 2.15).

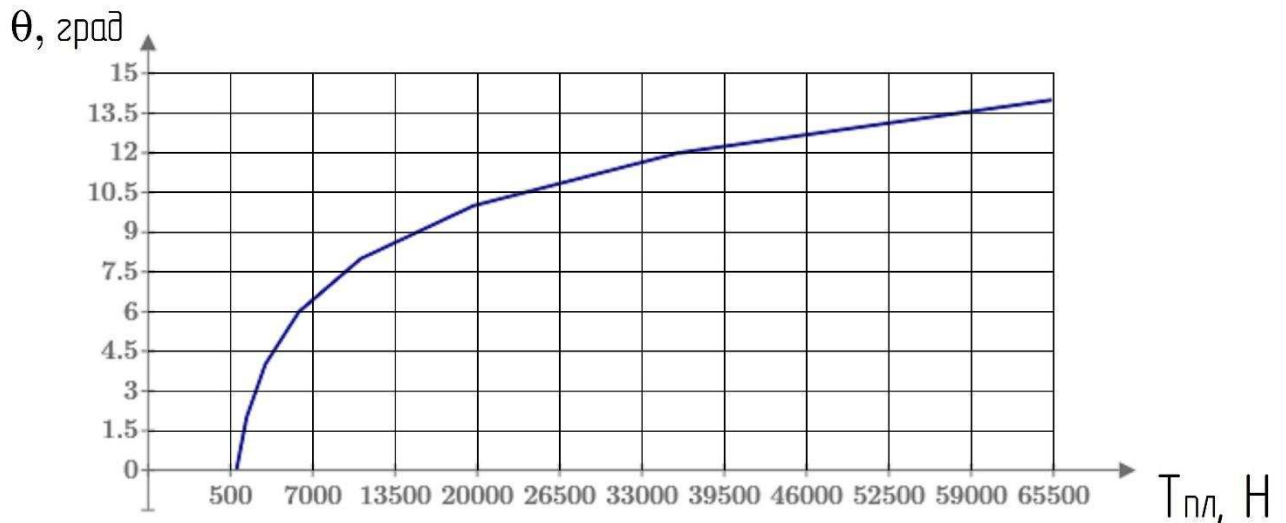


Рисунок 2.15 – График зависимости сжимающего усилия от угла охвата пласта

Из графика видно, что целесообразно рекомендовать уменьшать угол охвата пласта, т.к. при этом достигается снижение сжимающего усилия.

Наибольшей для данного отвала величина силы сжатия T_m достигает в сечении, соответствующем вступлению пласта на поверхность, так как в этом сечении действуют силы статического давления веса всего пласта и силы трения, распределенные по всей поверхности соприкосновения пласта с отвалом. Кроме того, в этом сечении сила T_m получает конечное приращение за счет силы T_F (2.40) и силы Q_t (2.50).

Таким образом, максимальное значение сжимающего усилия T_m имеет место на лапе и выражается формулой

$$T_m = T_{пл} + Q_t + T_F = (T_0 + f q_p) e^{f\theta} + f \left(k s^2 + \frac{abp}{g} v_e^2 \sin \varepsilon \sin \gamma \right). \quad (2.96)$$

Подставим в уравнение (2.96) значение уравнений (2.3), (2.92), (2.95), тогда формула примет вид:

$$T_m = \left(ab\rho gh_0 + f \frac{ab\rho gh_k}{R_{кр}\vartheta} \right) e^{f\theta} + f \left(0,1k_0\rho ghs^2 + \frac{abp}{g} v_e^2 \sin \varepsilon \sin \gamma \right). \quad (2.97)$$

Найдем усилие, необходимое для сообщения скорости частицам пласта. Ранее было найдено, что усилия, изменяющие абсолютную скорость частиц пласта при поступлении, направлены по направлению абсолютной скорости частиц, а при последующем движении – по главной нормали относительной траектории.

Определим главный вектор этих сил для пласта в целом. Применим теорему об изменении количества движения к элементарной массе dm пласта на конечном (от вступления на лезвие до схода с отвала) перемещении, получим:

$$\bar{R} \cdot dt = dm(\bar{v}_2 - \bar{v}_1), \quad (2.98)$$

где $\bar{R} = \sum \bar{F}_i$ – главный вектор внешних (для пласта почвы) сил, изменяющих скорость его частиц; dm – элементарная масса почвы, прошедшая через отвал за время dt ; \bar{v}_1 и \bar{v}_2 – вектор абсолютной скорости частицы до вступления на лезвие лопаты и после схода с отвала.

Так как $\bar{v}_1 = 0$, то

$$\bar{R} = \frac{dm}{dt} \bar{v}_2. \quad (2.99)$$

Составим проекцию на ось x , тогда:

$$R_x = \frac{dm}{dt} v_{2x}, \quad (2.100)$$

где v_{2x} – проекция на ось x абсолютной скорости частицы после схода с отвала, м/с.

Найдем проекцию скорости движения частицы пласта после схода с отвала на ось X из п.1.9 (Приложение 1):

$$v_x = v_e^2(1 - \psi \cos \beta_2). \quad (2.101)$$

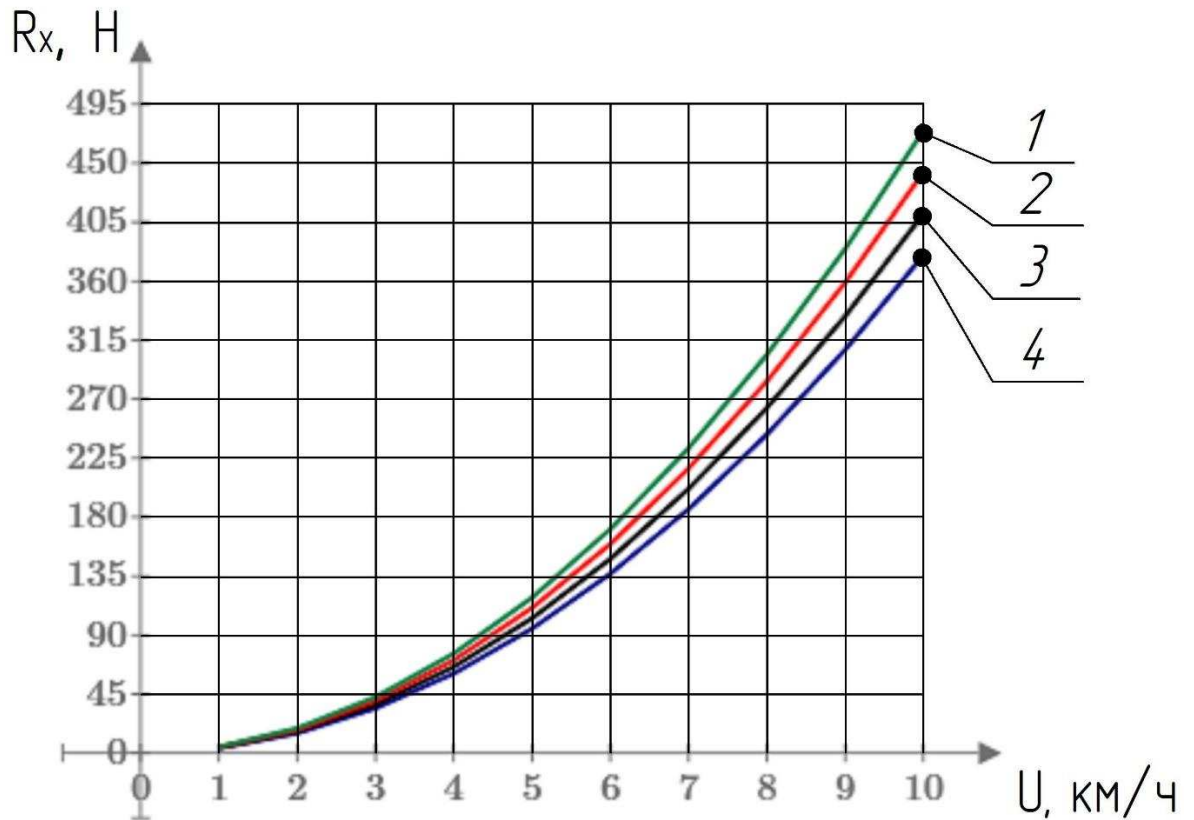
где β_2 – угол между касательной к относительной траектории движения пласта по отвалу и горизонтальной осью, град;

Подставляя в формулу (2.100) значения проекций скорости (2.101), получим:

$$R_x = \frac{ab\rho}{g} v_e^2 (1 - \psi \cos \beta_2). \quad (2.102)$$

Проекция вектора \bar{R} на ось x в формуле (2.102) представляет собой часть тягового усилия, расходуемого на сообщение скорости частицам пласта.

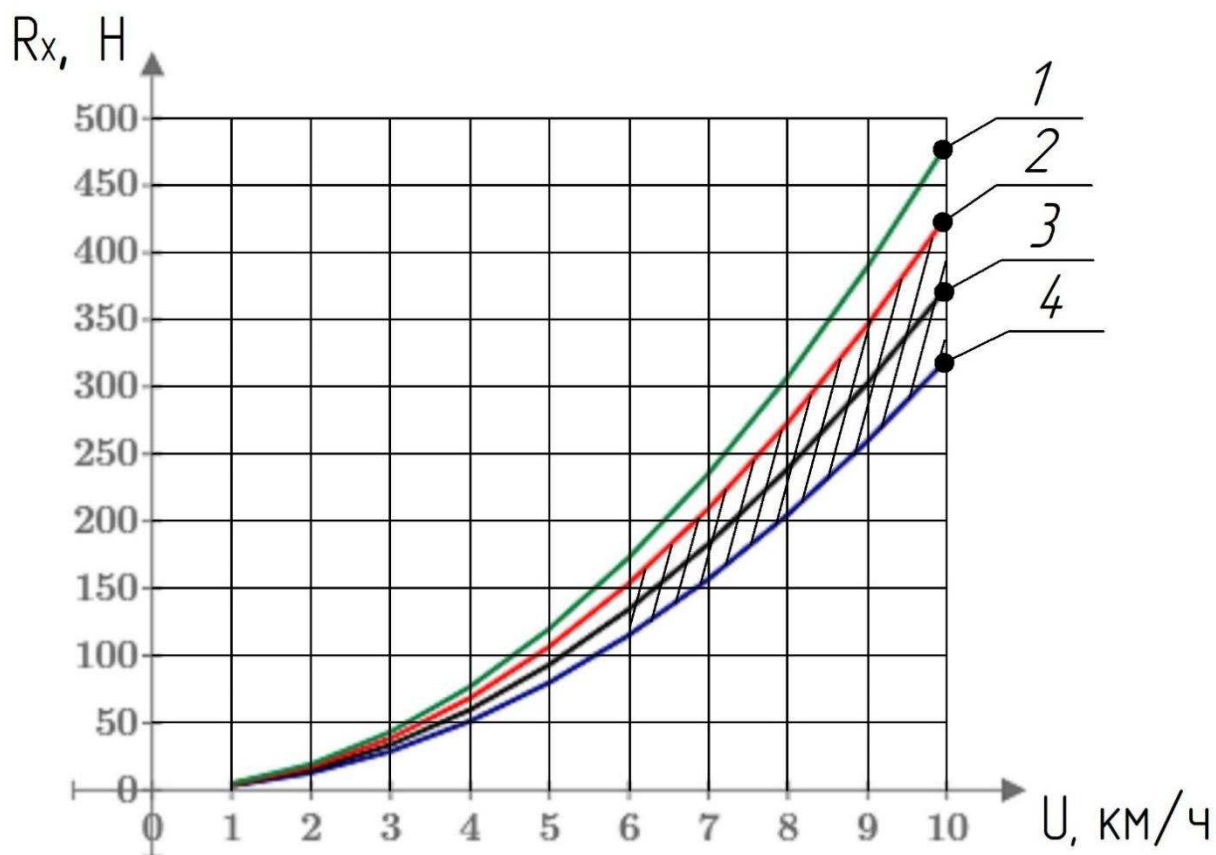
Для определения зависимости усилия R_x от конструктивных параметров примем: $\rho = 1200 \dots 1500$ кг/м³; $b = 0,25$ м; $v_e = 1 \dots 10$ км/ч; $\beta_2 = 45$ град; $\psi = 0,5$; $a = 0,18 \dots 0,27$ м; $g = 9,8$ м/с². Построим график зависимости усилия R_x от скорости движения и плотности почвы (рисунок 2.16).



1 – $\rho = 1500$ кг/м³; 2 – $\rho = 1400$ кг/м³; 3 – $\rho = 1300$ кг/м³; 4 – $\rho = 1200$ кг/м³

Рисунок 2.16 – График зависимости усилия R_x от скорости движения и плотности почвы

Построим график зависимости усилия R_x от скорости движения и толщины пласта почвы (рисунок 2.17).



$$1 - a = 0,27; 2 - a = 0,24; 3 - a = 0,21; 4 - a = 0,18$$

Рисунок 2.17 – График зависимости усилия R_x от скорости движения и толщины пласта почвы

Из графика (рисунок 2.16) следует, что с уменьшением скорости движения усилие R_x значительно снижается, а изменение плотности почвы меньше влияет на этот показатель. Расхождение между значениями усилий на кривых при максимальной скорости составило менее 10 %. Исходя из этого, можно сделать вывод, что на усилие R_x в большей степени влияет скорость движения, чем плотность почвы. При движении со скоростью 6 км/ч интервал значений усилия сообщения скорости частицам пласта составит от 140 до 170 Н, а при 10 км/ч от 380 до 480 Н.

Построив график (рисунок 2.17) видно, что влияние толщины пласта почвы на усилие наиболее заметно с увеличением скорости движения. С повышением скорости движения и толщины пласта почвы усилие заметно увеличивается. При скорости 5 км/ч расхождение между ближайшими кривыми усилий

составило в среднем 10 Н, а при 10 км/ч составило 50 Н. Так, с увеличением скорости движения рационально снижать толщину обрабатываемого пласта почвы. Рекомендуется принимать толщину обрабатываемого пласта от 18 до 24 см, т.к. этот диапазон позволяет снизить усилие на сообщение скорости частицам пласта при сохранении качества обработки почвы.

При движении со скоростью 6 км/ч интервал значений усилия сообщения скорости частицам пласта составит от 120 до 180 Н, а при 10 км/ч от 320 до 480 Н.

Определим часть тягового усилия необходимого для преодоления сил тяжести и трения пласта об поверхность корпуса многофункционального средства P_T . Из уравнения равновесия вступающей на лапу части пласта найдем соотношение между силами P_T и T_m :

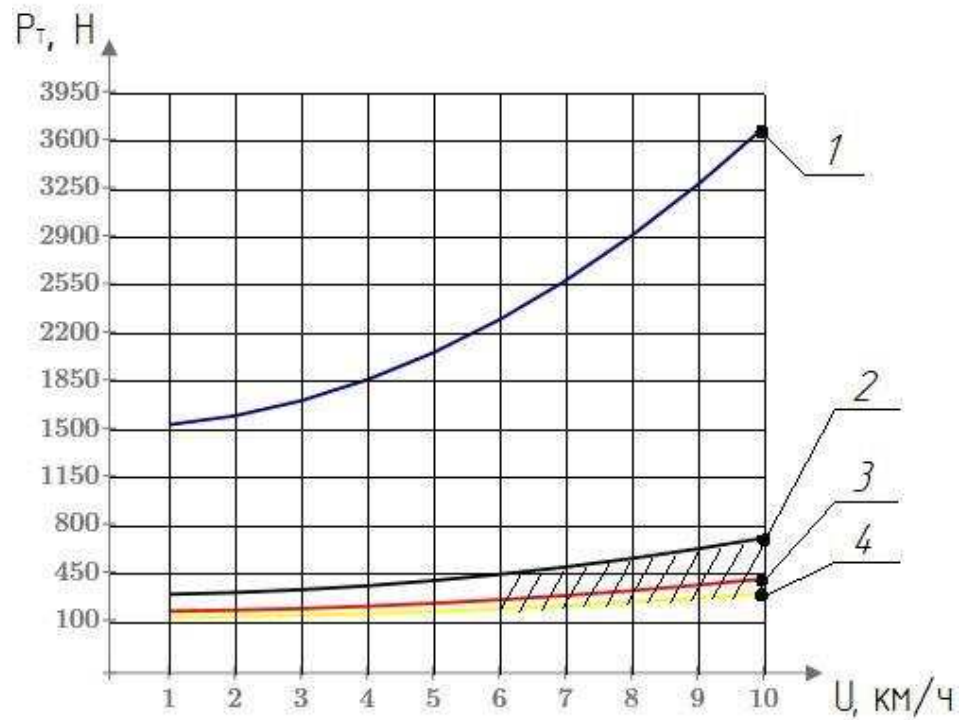
$$P_T = \frac{1}{\cos\beta_1 - f\sin\beta_1} T_m. \quad (2.103)$$

Подставляя сюда значение T_m из формулы (2.97), получим часть тягового усилия, необходимого для преодоления сил трения и веса пласта:

$$P_T = \frac{1}{\cos\beta_1 - f\sin\beta_1} \left[\left(ab\rho gh_0 + f \frac{ab\rho gh_k}{R_{\text{кр}}\vartheta} \right) e^{f\theta} + f \left(0,1k_0\rho ghs^2 + \frac{\alpha b\rho}{g} v_e^2 \sin\varepsilon \sin\gamma \right) \right]. \quad (2.104)$$

Для определения зависимости усилия P_T от конструктивных и режимных параметров подставим в уравнение (2.104) значения: $\rho = 1300$ кг/м³; $a = h = 0,18 \dots 0,27$ м; $f = 0,4$; $2\gamma = 15 \dots 60$ град; $b = 0,25$ м; $v_e = 1 \dots 10$ км/ч; $\beta_1 = 15 \dots 60$ град; $\varepsilon = 15^\circ = 0,262$, рад; $\psi = 0,5$; $g = 9,8$, м/с²; $r = 0,02$ м; $\theta = 6$ град.

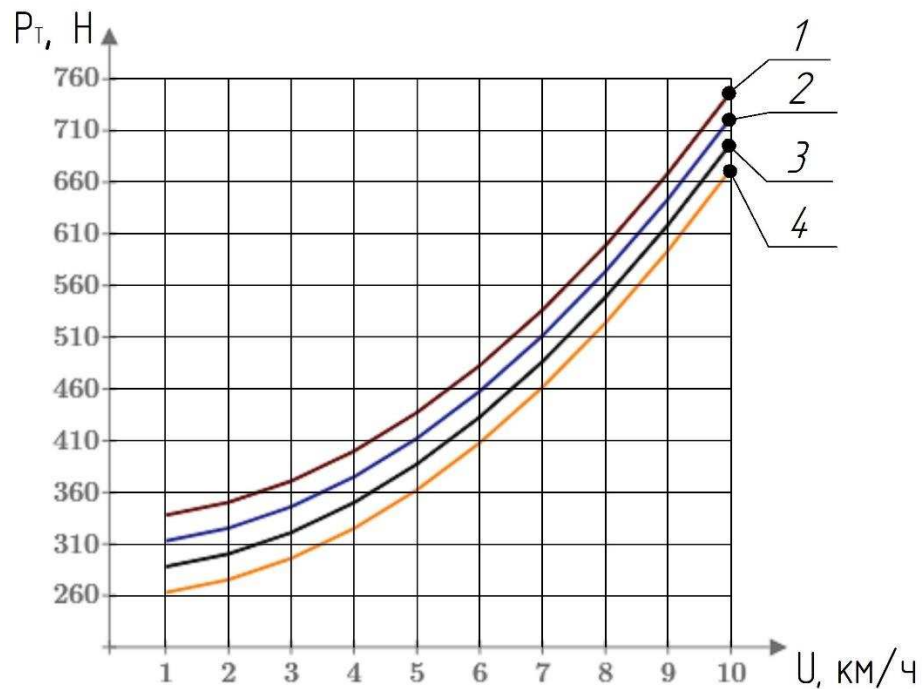
Построим график зависимости усилия преодоления веса и трения пласта от скорости движения и угла β_1 (рисунок 2.18).



$$1 - \beta_1 = 60^\circ; 2 - \beta_1 = 45^\circ; 3 - \beta_1 = 30^\circ; 4 - \beta_1 = 15^\circ$$

Рисунок 2.18 – График зависимости усилия P_T от скорости движения и угла β_1

Построим график зависимости усилия преодоления веса и трения пласта от скорости движения и глубины обработки (рисунок 2.19).



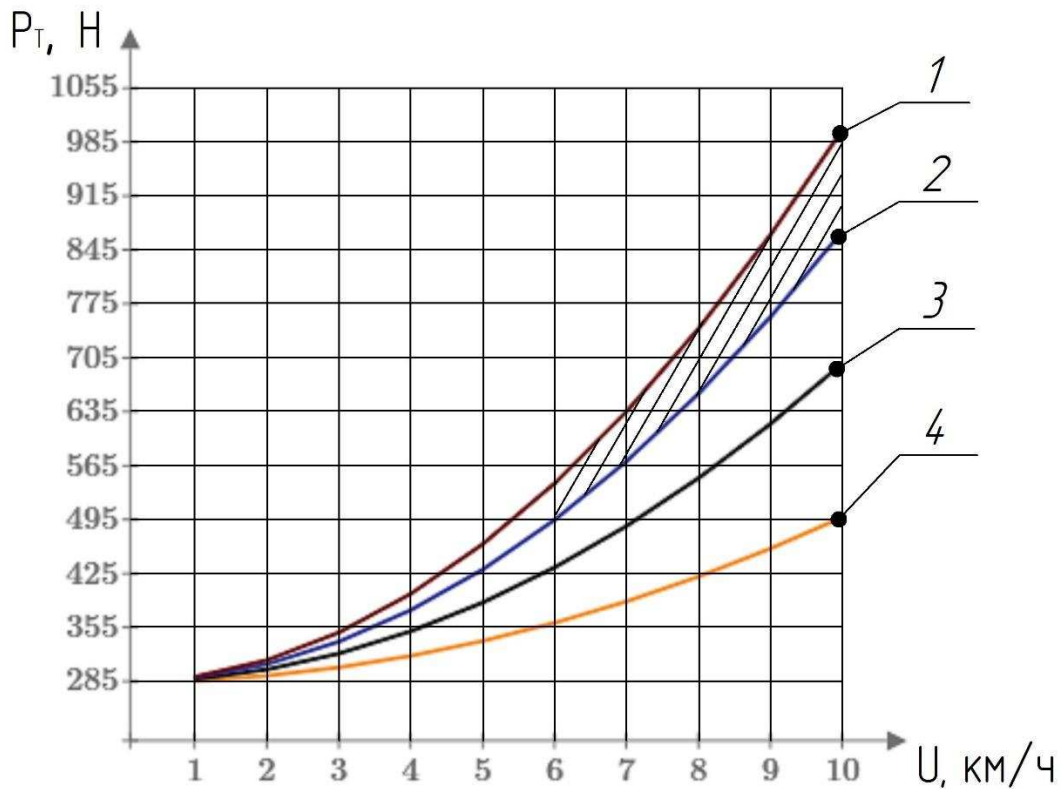
$$1 - h = 0,27 \text{ м}; 2 - h = 0,24 \text{ м}; 3 - h = 0,21 \text{ м}; 4 - h = 0,18 \text{ м}$$

Рисунок 2.19 – График зависимости усилия P_T от скорости движения и глубины обработки

Из графика (рисунок 2.18) видно изменение усилий для преодоления веса и трения пласта от уменьшения угла между траекторией на плоскости отвала и горизонтом. При изменении угла β_1 с 30 до 60 градусов при скорости 10 км/ч усилие уменьшилось на 400 Н, а при 6 км/ч на 300 Н. Следовательно, рекомендуется принимать угол β_1 в пределах от 30 до 60 градусов, т.к. при угле менее 30 градусов возникает интенсивный рост усилия преодоления веса и трения пласта.

Анализ графика (рисунок 2.19) показал, что с уменьшением глубины обработки почвы на 3 см усилие преодоления веса и трения пласта уменьшается в среднем на 50 Н. Кривые имеют нелинейную зависимость и с увеличением скорости значения усилий увеличиваются от 260 до 760 Н. Для снижения усилия преодоления веса и трения пласта рекомендуется принимать глубину обработки в пределах от 18 до 24 см.

Построим график зависимости усилия P_T от скорости движения и угла раствора лапы 2γ (рисунок 2.20).



$$1 - 2\gamma = 60^\circ ; 2 - 2\gamma = 45^\circ ; 3 - 2\gamma = 30^\circ ; 4 - 2\gamma = 15^\circ$$

Рисунок 2.20 – График зависимости усилия P_T от скорости движения и угла раствора лапы

Анализ графика (рисунок 2.20) показал, что увеличение угла раствора лапы на 15 градусов приводит к повышению усилия преодоления веса и трения пласта в среднем на 250 Н. При высоких скоростях обработки почвы наиболее сильное влияние на усилие имеет угол раствора лапы. С ростом скорости сопротивление растет не пропорционально, а по параболе. При повышении скорости увеличивается производительность почвообрабатывающих средств, но также увеличивается и тяговое сопротивление, исходя из этого целесообразно рекомендовать скорость в вершине параболической кривой, то есть от 6 до 10 км/ч. По конструктивным соображениям угол раствора лапы нельзя уменьшать значительно, т.к. он на прямую влияет на ширину захвата средства и тем самым снижает производительность. Рекомендуется принимать угол раствора лапы от 45 до 60 градусов.

Тяговое сопротивление рабочего органа находится из уравнения (2.1). Система, описывающая каждый этап движения пласта, состоит из уравнений (2.28), (2.59), (2.102), (2.104). Тогда получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = S_x + Q_{nx} + R_x + P_T \\ S_x = 2(T_1 + T_2)\cos\gamma + 2(N_1 + N_2)\sin\gamma \\ Q_{nx} = Q_n \sin\varepsilon \sin\gamma \\ R_x = \frac{ab\rho}{g} v_e^2 (1 - \psi \cos\beta_2) \\ P_T = \frac{1}{\cos\beta_1 - f \sin\beta_1} \\ \cdot \left[\left(ab\rho g h_0 + f \frac{ab\rho g h_k}{R_{кр} \vartheta} \right) e^{f\theta} + f \left(0,1k_0 \rho g h s^2 + \frac{ab\rho}{g} v_e^2 \sin\varepsilon \sin\gamma \right) \right] \end{array} \right. \quad (2.105)$$

На основании априорной информации и собственных поисковых исследований принимаем следующие параметры для системы: $p = 1200 \dots 1500$ кг/м³; $a = h = 0,18 \dots 0,24$ м; $\varepsilon = 15^\circ \dots 30^\circ = 0,262 \dots 0,524$ рад; $v_e = v_p = 1 \dots 10$ км/ч; $f = 0,2 \dots 0,5$; $g = 9,8$ м/с²; $\theta = 6$ град.

Построим область предельных значений тягового сопротивления (рисунок 2.21).

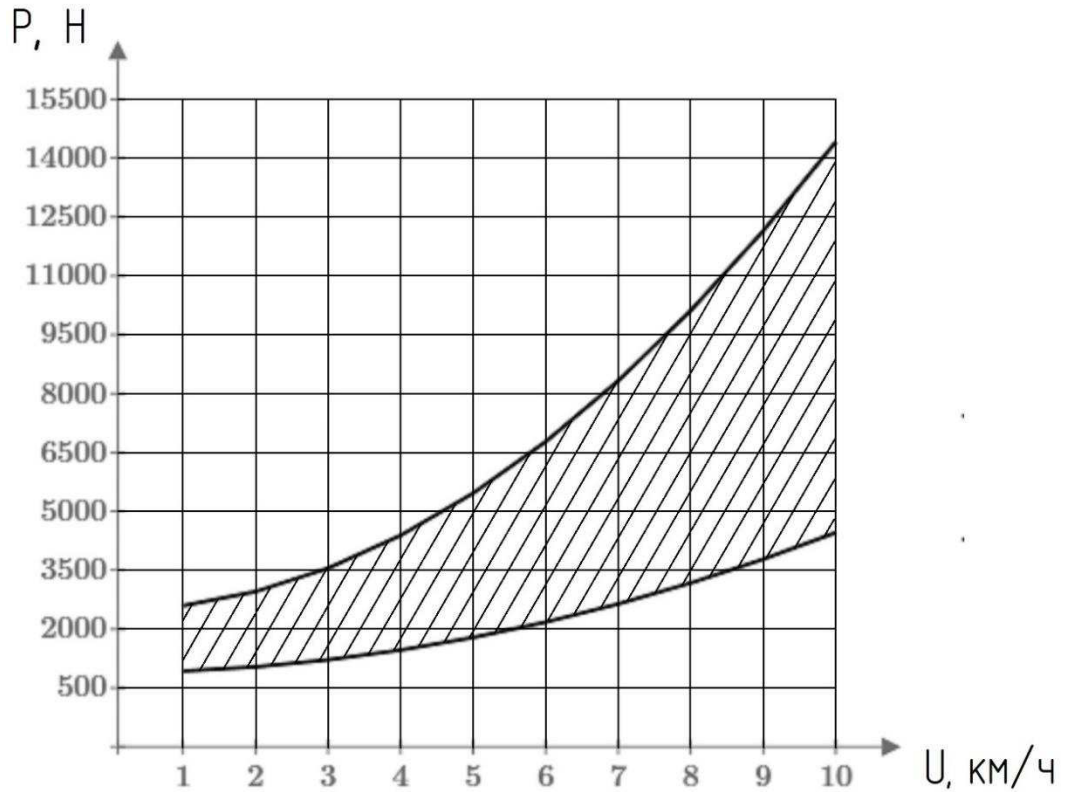


Рисунок 2.21 – Область предельных значений тягового сопротивления

Подставим в формулу 2.1 выражения, которые были найдены ранее (2.29), (2.61), (2.102), (2.104), и получим итоговую формулу с раскрытыми значениями и зависимостями:

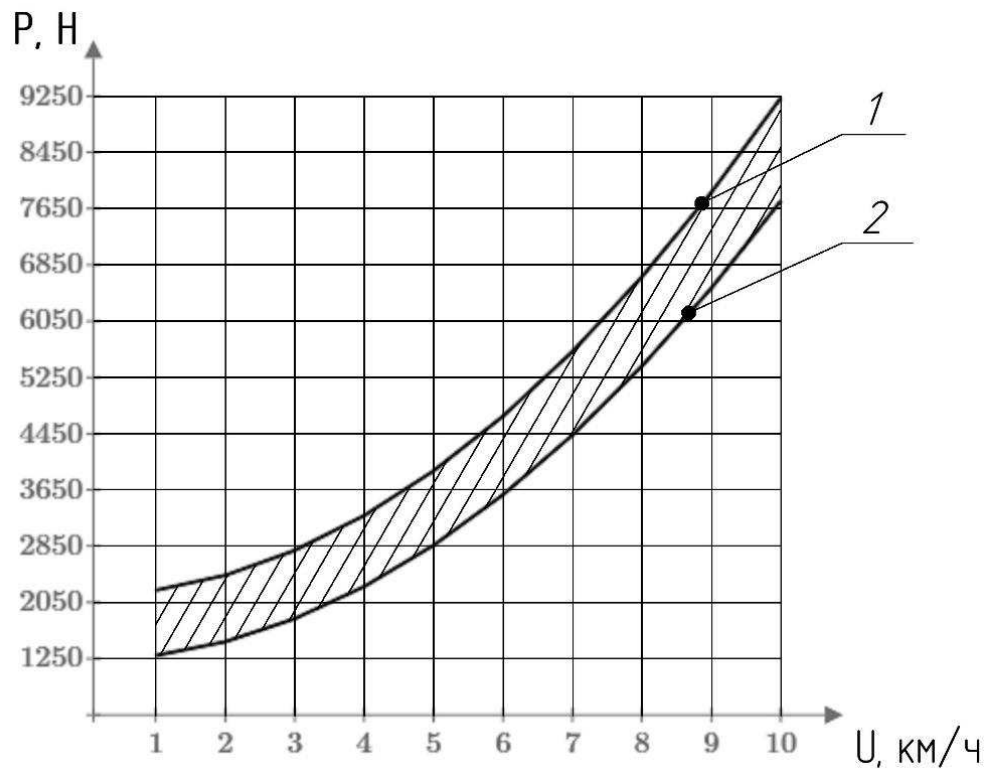
$$\begin{aligned}
 P = & 2 \left(0,1k_0\rho ghb \frac{\sin 2\varphi}{\operatorname{tg}\gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{4\operatorname{rcos}(\varepsilon)}{\sqrt{1-\sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}} d\varepsilon + \right. \\
 & + f \frac{\rho}{g} b v_e^2 \sin 2\gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^2\varepsilon \cdot 4\operatorname{rcos}(\varepsilon)}{\sqrt{1-\sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}} d\varepsilon \left. \right) \cos\gamma + 2 \left(0,2k_0\rho ghb \frac{\cos^2\varphi}{\sin\gamma} \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin\varepsilon + \right. \right. \\
 & \left. \left. + f \sin\gamma \frac{\cos^2\varepsilon}{\sqrt{1-\sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}} \right) 4\operatorname{rcos}(\varepsilon) d\varepsilon + 2 \frac{\rho}{g} b v_e^2 \sin\gamma \int_{\varepsilon}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin\varepsilon + \right. \right. \\
 & \left. \left. + f \sin\gamma \frac{\cos^2\varepsilon}{\sqrt{1-\sin^2\gamma \sin^2\varepsilon}} \right) 4\operatorname{rcos}(\varepsilon) \cdot \sin^2\varepsilon d\varepsilon \right) \sin\gamma + 0,1k_0\rho g h s^2 \cdot \sin\varepsilon \sin\gamma + \\
 & + \frac{ab\rho}{g} v_e^2 (1 - \psi \cos\beta_2) + \frac{1}{\cos\beta_1 - f \sin\beta_1} \left[\left(ab\rho g h_0 + f \frac{ab\rho g h_k}{R_{\text{кр}\vartheta}} \right) e^{f\theta} + f \left(0,1k_0\rho g h s^2 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{ab\rho}{g} v_e^2 \sin\varepsilon \sin\gamma \right) \right], \tag{2.106}
 \end{aligned}$$

где ρ – плотность почвы, кг/м³; h – глубина обработки, м; a – толщина пласта, м;

k_0 – безразмерная постоянная, характеризующая фрикционные свойства разрезаемой среды; f – коэффициент трения почвы о поверхность лезвия; γ – половина угла раствора лапы, град; b – половина ширины захвата, м; η – угол к касательной относительной траектории с образующей цилиндра, град; v_e – переносная скорость, м/с; β_1 – угол между касательной к относительной траектории движения пласта по лапе и горизонтальной осью, град; β_2 – угол между касательной к относительной траектории движения пласта по отвалу и горизонтальной осью, град; ε – угол заточки лезвия, рад; ψ – коэффициент сжатия пласта; g – гравитационная постоянная, м/с²; s – переменная деформация пласта, м; h_0 – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в наивысшей точке траектории вне отвала и в месте схода пласта с отвала, м; r – радиус производящего круга, м; θ – угол охвата пласта отвалом, град; $R_{кр}$ – радиус кривизны траектории, м; ϑ – центральный угол дуги траектории, град; h_k – разность уровней расположения центров тяжести сечения пласта в начальной точке траектории на отвале и в месте схода пласта с отвала, м.

На основании априорной информации и собственных поисковых исследований принимаем следующие параметры: $\rho = 1300$ кг/м³; $f = 0,4$; $\gamma = 30$ град; $b = 0,25$ м; $v_e = 1 \dots 10$ км/ч; $\beta_1 = 35$ град; $\beta_2 = 45$ град; $\varepsilon = 15^\circ = 0,262$, рад; $\psi = 0,5$; $a = h = 0,18 \dots 0,24$ м; $g = 9,8$ м/с²; $s = 0,1$ м; $h_0 = 0,2$; $r = 0,02$ м; $\theta = 6$ град.

Построим график зависимости тягового сопротивления от скорости движения и глубины обработки (рисунок 2.22). Приняв глубину обработки почвы от 18 до 24 см рассчитаем тяговое сопротивление для крайних интервалов и соединим в общую область тягового сопротивления.



$1 - h = 0,24$ м; $2 - h = 0,18$ м.

Рисунок 2.22 – График зависимости тягового сопротивления от скорости движения и глубины обработки

2.3 Моделирование силовых параметров многофункционального почвообрабатывающего средства в САПР

Взаимодействие рабочего органа с почвой включает множество факторов и параметров. Для расчета силовых параметров целесообразно использовать системы автоматического проектирования (САПР). Существует множество программ, моделирующих движение объекта в сжимаемых и несжимаемых средах [120]. Чтобы составить такую модель необходимо знать параметры среды, в которой движется рабочий орган. Примем параметры среды, взятые ранее для (2.105). Программа, в которой будет проводиться исследование, называется SOLIDWORKS Flow Simulation. Данная программа отвечает международным стандартам в сфере компьютерного проектирования и конструирования и обладает значительным функционалом.

Первым этапом происходит 3D-моделирование почвообрабатывающего средства в натуральную величину (рисунок 2.23). Создаются эскизы с последующим выдавливанием. Данная 3D модель отражает рабочее положение рабочего органа и включает все геометрические параметры в натуральном их виде.

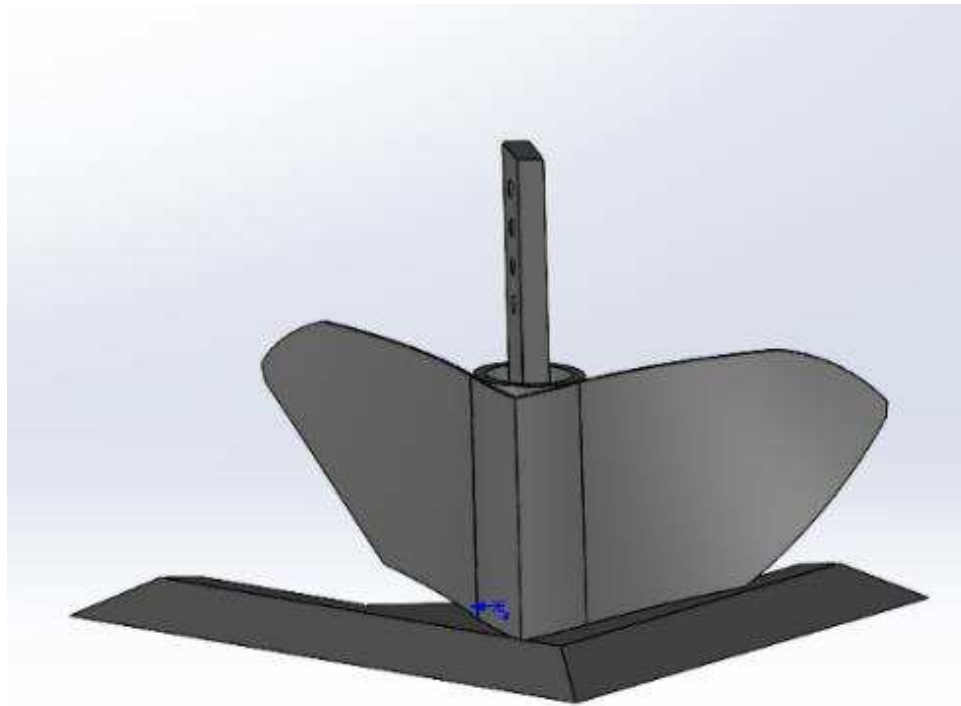


Рисунок 2.23 – Изображение 3D модели почвообрабатывающего средства

Вторым этапом задаются начальные параметры, такие как скорость движения в среде с векторным направлением, параметры среды, сжимаемость или не сжимаемость почвы и ставятся цели моделирования. Цели моделирования были приняты следующего вида: сила сопротивления фронтальных поверхностей, траектория движения частиц почвы, поверхностная эпюра давления, создаваемого от движения в слое почвы. В процессе расчета обязательно находить все цели вместе их можно выводить на 3D модель поочерёдно. Далее задается исследуемая область, в которой и будут находиться необходимые нам цели. На рисунке 2.24 задается расчетная область.

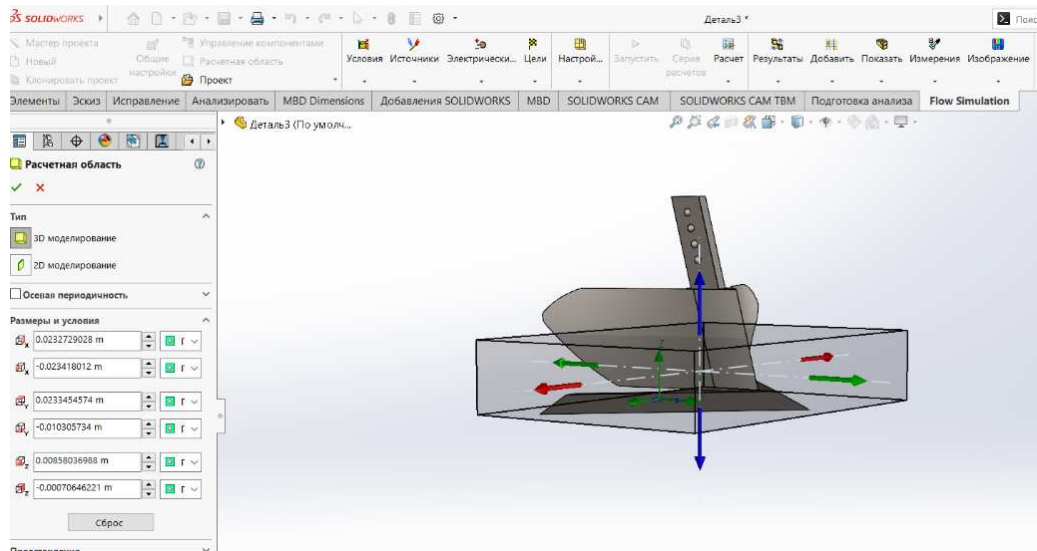


Рисунок 2.24 – Изображение определения расчетной области

После определения расчетной области задаются единицы измерения и устанавливаются параметры среды, в которой проходит моделирование. Полученные результаты можно отобразить в различном виде: представлена эпюра поверхностного давления на фронтальную проекцию рабочего органа (рисунок 2.25).

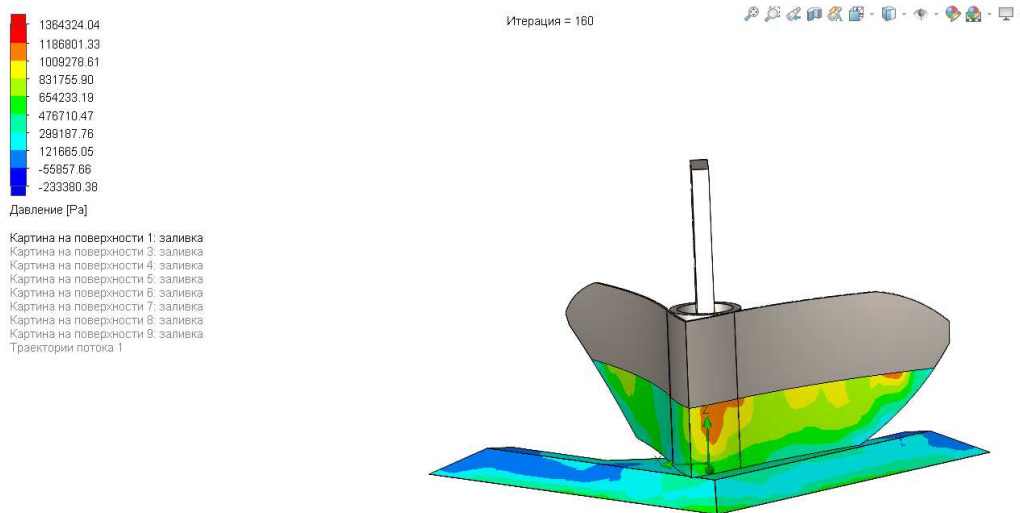


Рисунок 2.25 – Изображение рабочего органа с нанесенной эпюрой давления на фронтальную поверхность

Была получена траектория движения пласта почвы по поверхности рабочего органа (рисунок 2.26).

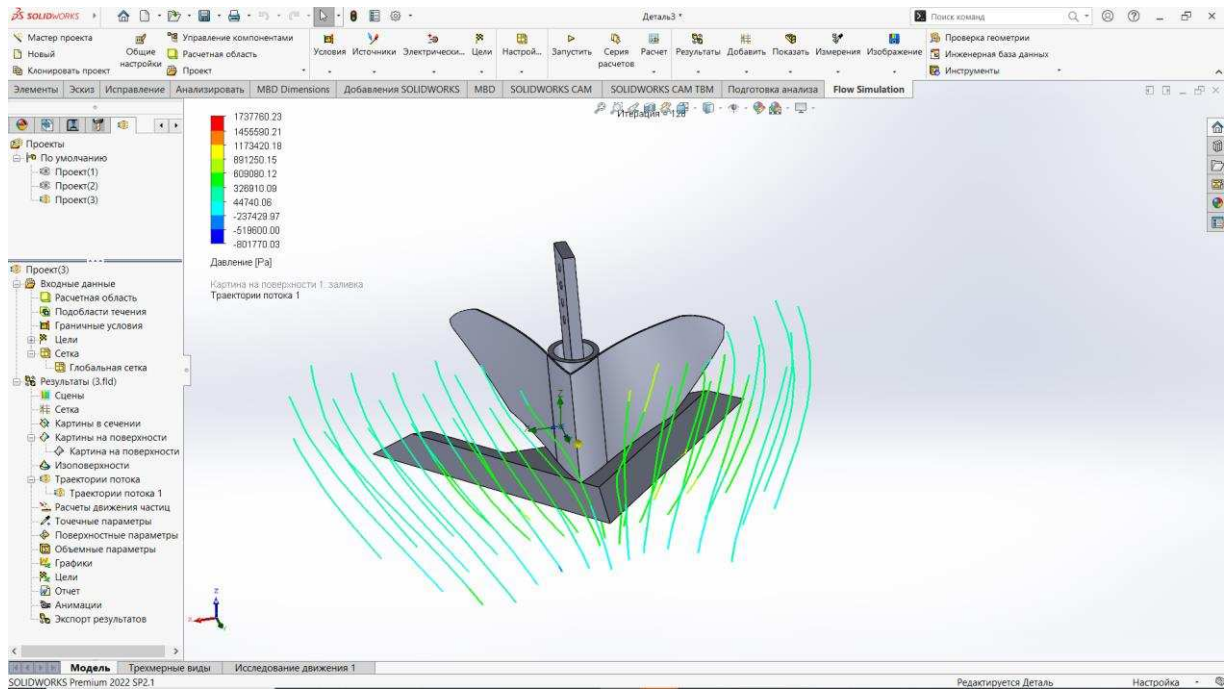


Рисунок 2.26 – Изображение траектории движения пласта почвы

А также было получено значение тягового сопротивления при скорости 6 км/ч которое составило 5130 Н (рисунок 2.27).

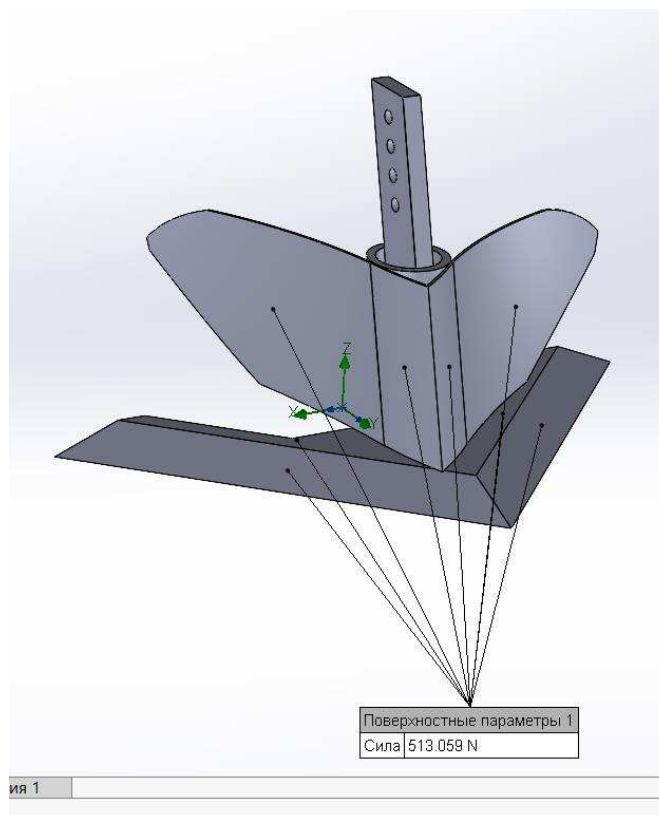


Рисунок 2.27 – Изображение результата расчета тягового сопротивления почвообрабатывающего средства в SolidWorks

Данное значение входит в область аналитических зависимостей (2.105) что подтверждает сходимость аналитических зависимостей с компьютерной моделью, полученной в программе SolidWorks.

2.4 Выводы по главе

1. Разработана и обоснована конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и чизельной лапой для обработки почвы в режиме отвальной и безотвальной вспашки.

2. Получены аналитические зависимости, включённые в программу САПР для определения тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства, зависящие от: угла наклона лапы, плотности почвы, коэффициента трения почвы о лапу, ширины лапы, угла раствора лапы, угла заточки, глубины обработки, угла поворота отвалов, углов вступления пласта на отвал, скорости движения, глубины обработки.

3. При скорости от 6 до 10 км/ч тяговое сопротивление рабочего органа многофункционального средства составило от 3500 до 9250 Н.

4. При глубине обработки от 18 до 24 см и постоянной скорости 8 км/ч усилие резания пласта лапой составило от 2100 до 2750 Н.

5. Получены эпюры давления на фронтальную поверхность многофункционального почвообрабатывающего средства в программе САПР для наглядного представления тягового сопротивления от формы фронтальной поверхности. По ним было получено значение тягового сопротивления при скорости 7 км/ч, которое составило 5130 Н.

6. Согласно аналитическим зависимостям получена область тягового сопротивления многофункционального почвообрабатывающего средства в предельных режимах и параметрах. Изменение тягового сопротивления при фиксированной скорости в 6 км/ч составило от 2200 до 6800 Н, а при 10 км/ч от 4500 до 14500 Н.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

3.1 Программа экспериментальных исследований и описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования преследуют подтверждение достоверности теоретических исследований. Это затрагивает процесс основной обработки почвы с последующим определением качества рыхления, образования глыб, неровностей на поверхности поля и удельного тягового сопротивления предлагаемого рабочего органа.

Методика и программа проводимых исследований включает выполнение следующих процедур:

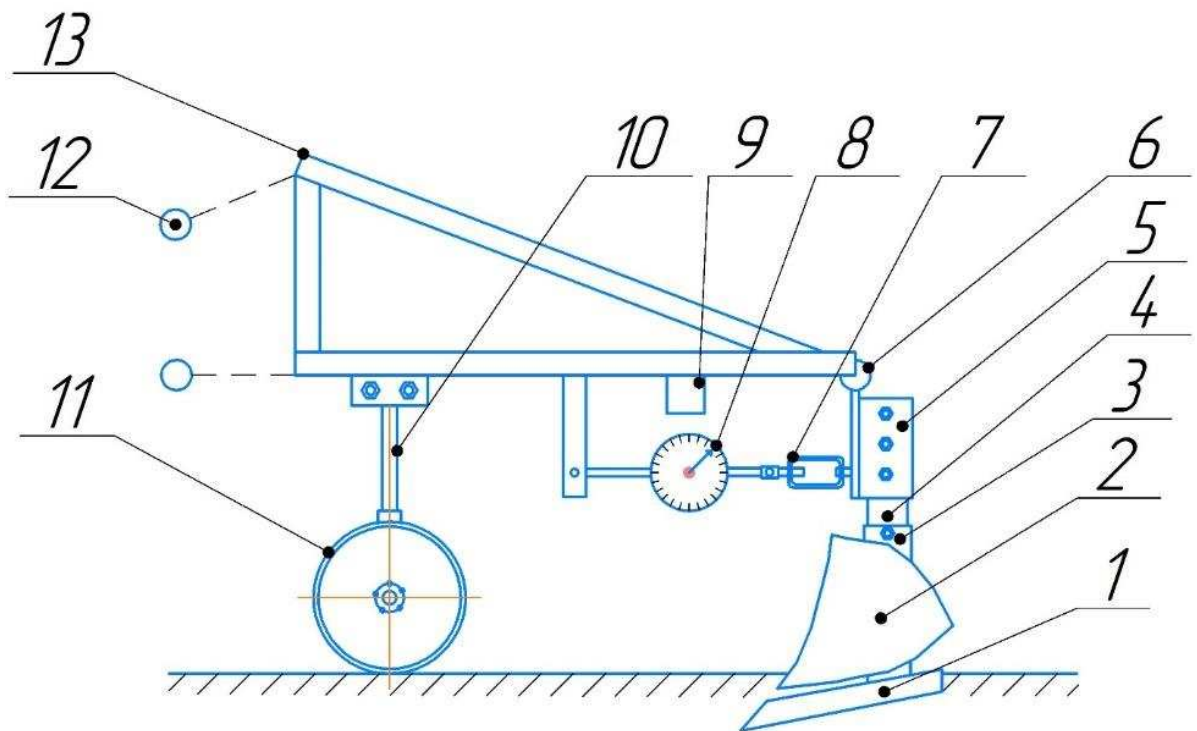
- при помощи известных методик исследовать физико-механические свойства обработанной и необработанной почвы;
- по данным динамометра определить силы сопротивления экспериментального рабочего органа при изменении угла поворота отвала, скорости движения агрегата и глубины обработки в различных зонах Краснодарского края;
- определить эксплуатационные и энергетические характеристики, вычислить и проанализировать следующие параметры: скорость передвижения средства, его производительность, расход горючего и энергоемкость;
- провести сравнение результатов испытаний многофункционального средства и теоретических исследований.

Изготовлено многофункциональное почвообрабатывающего средство (рисунок 3.1) в соответствии с патентом на полезную модель РФ №225628 [76].

Была разработана специальная установка патент РФ №2436270 [79] (рисунок 3.2) для проведения полевых исследований, с помощью которой измерялась величина горизонтальной составляющей силы сопротивления рабочего органа во время обработки почвы [20, 37].



Рисунок 3.1 – Общий вид экспериментального рабочего органа



- 1 – треугольная лапа; 2 – съёмные отвалы; 3 – фиксатор поворотного механизма; 4 – стойка;
 5 – крепление стойки совместно с подвижной пластиной; 6 – шарнир (петля);
 7 – регулировочный талреп; 8 – динамометр; 9 – закреплённая камера (смартфон);
 10 – регулировочный механизм опорного колеса; 11 – опорное колесо; 12 – навеска; 13 – рама

Рисунок 3.2 – Конструктивно–технологическая схема экспериментальной установки для определения тяговых характеристик рабочего органа

Установку навешивали на трактор МТЗ-82 (рисунок 3.3) тягового класса 1,4. Рабочий орган представляет собой треугольную лапу ПЧН-3.2, на которую были установлены отвалы с поворотным механизмом (патент РФ № 225628).



Рисунок 3.3 – Общий вид трактора МТЗ-82 с экспериментальной установкой

Глубина обработки была задана при помощи винтовой регулировки опорных колес путем опускания колес до соприкосновения с набранными брусками необходимой толщины (рисунок 3.4). Высота набранных брусков была увеличена на 2 см с учетом продавливания почвы. [26, 102].



Рисунок 3.4 – Изображение регулировки глубины обработки рабочим органом

Регулировка перекоса навески (рисунок 3.5) производилась по стандартной методике [38] путем удлинения и укорочения тяг навески при помощи резьбового соединения.



Рисунок 3.5 – Изображение регулировки перекоса навески

Экспериментальный рабочий орган закреплен на установке, которая работает по следующему принципу. В ходе обработки почвы самоходное транспортное средство перемещает установку, в этот момент рабочий орган погружается в почву на заданную опорными колесами глубину обработки. Силы сопротивления, действующие на пахотный рабочий орган, вызывают отклонение вала в противоположную сторону от направления движения. Вал, установленный в подшипниках, закрепленных на пластине, воздействует на динамометр (рисунок 3.6), который фиксирует величину силы, действующую на рабочий орган. Перед каждым опытом при помощи стяжного устройства устанавливаем шкалу динамометра на «0».



Рисунок 3.6 – Изображение закрепленного динамометра в экспериментальной установке

3.2 Методика экспериментального исследования и применяемые приборы

Метеорологические условия: температура, относительная влажность воздуха, осадки, скорость ветра берутся с метеорологической станции, расположенной вблизи места проведения полевых эксплуатационных испытаний.

В ходе испытаний, проводимых на территории хозяйства, были собраны почвенные образцы, тип и механический состав которых был определен с использованием почвенной карты. В соответствии с ГОСТ 20915-2011, полученные комки почвы были разделены на фракции [25].

Чтобы проанализировать агрегатный состав почвы на обрабатываемом участке, было собрано пять образцов почвы массой не менее 2,5 кг из слоя, толщина которого соответствовала глубине хода рабочих органов. После высушивания до воздушно-сухого состояния, образцы были просеяны через набор сит с отверстиями различного размера (10, 7,5, 3, 2, 1, 0,5 и 0,25 мм) без встряхивания, наклоняя их в разные стороны. Комки почвы больше 10 мм, оставшиеся на верхнем сите, были разделены вручную на три фракции [28]. Все фракции взвешивали и подсчитывали их процент в массе навески.

Для определения влажности почвы пробы отбирались буром в пяти местах, расположенных по диагонали участка [30]. Глубина отбора проб устанавливалась равной глубине обработки почвы. Влажность определялась по среднему образцу почвы по глубине обработки. Вытянутый буром образец почвы из данного слоя высыпался в тару, тщательно перемешивался и отбирался в алюминиевые стаканчики для дальнейшего анализа [28].

Отобранную пробу почвы массой 30-40 г помещали в герметичный контейнер и отправляли в лабораторию для взвешивания в соответствии с требованиями ГОСТ 20915-2011.

Абсолютную влажность почвы определяли по стандартной методике ГОСТ 5180–2015 [28].

Твердость почвы определяем почвенным твердомером в местах определения влажности. При снятии каждой диаграммы самопишущим твердомером проверя-

ли качество ее записи и исправность работы записывающего устройства. Острие записывающего устройства должно совпадать с нулевой линией [22]. Отклонение не должно превышать ± 1 мм.

Твердость почвы в килограммах на квадратный сантиметр определяли по методике из ГОСТ 20915-2011 [25].

По результатам замеров проводился статистический анализ с последующим занесением в таблицу 3.6 [1, 2, 5, 18, 89].

При испытаниях навесных сельскохозяйственных машин и орудий без привода рабочих органов от трактора измеряются следующие величины:

- время проведения измерений;
- тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины при выполнении технологических операций;
- длина пути, пройденного сельскохозяйственной машиной за время измерений.

Допустимые погрешности измерений при исследовании приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Допускаемые погрешности измерений при исследовании

Наименование показателя	Относительная погрешность измерения
Время измерения, с	$\pm 0,2$
Длина пути, пройденного сельскохозяйственной машиной, %	$\pm 1,0$
Тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины, %	$\pm 2,5$
Количество израсходованного топлива за время измерения, %	$\pm 1,5$

Плотность почвы определяли по ГОСТ 5180–2015 [28]. При этом пользуясь плотномером «Wile SOIL» (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Общий вид плотномера Wile SOIL

Плотномер Wile SOIL — это прибор для измерения плотности почвы, разработанный компанией Wile. Характеристики прибора:

- диапазон измерения плотности от 0 до 2,5 г/см³;
- точность измерения $\pm 0,01$ г/см³;
- размер образца почвы при измерении от 50 мм в диаметре и 50 мм в высоту;
- вес прибора около 2 кг;
- источник питания батарея типа «Д».

Глубину определения плотности почвы устанавливали такую же, как и при отборе проб на влажность и твердость. Пробы на плотность почвы проводили специальным пенетрометром Farmcomp Wile Soil. А также для проверки плотности почвы в разных точках поля был использован бур. Во время погружения бура в почву для отбора пробы добивались перпендикулярного давления на почву, избегая её прессования. После вдавливания бур поворачивали несколько раз и аккуратно извлекали из почвы, срезая лишнюю часть пробы ножом по краям. Затем стакан бура отвинчивали, очищали от прилипшей почвы, закрывали крышками и отправляли в лабораторию для дальнейшего анализа. В лаборатории плотность почвы определяли по [28].

Длину обрабатываемого участка фиксировали установкой вешек в начале и конце участка на расстоянии 50 м (рисунок 3.8). Расстояние установки промежуточных столбиков составляло 10 м. Столбы представляли белые контрастирующие с землей элементы, воткнутые в землю под прямым углом на глубину 5–10 см и имели высоту 2 м.



Рисунок 3.8 – Изображение расстановки контрольных вешек

Установленная на тракторе система ГЛОНАССSoft (рисунок 3.9) в процессе испытания замеряла расход топлива и показывала картографическое отображение места проведения испытаний. ГЛОНАССSoft имеет широкий функционал при помощи программы можно замерять различные параметры такие как: скорость движения, расход топлива, уровень в топливном баке и др. Эта система позволяет строить траектории движения во временных диапазонах и показывает во времени при помощи гистограмм необходимые параметры.

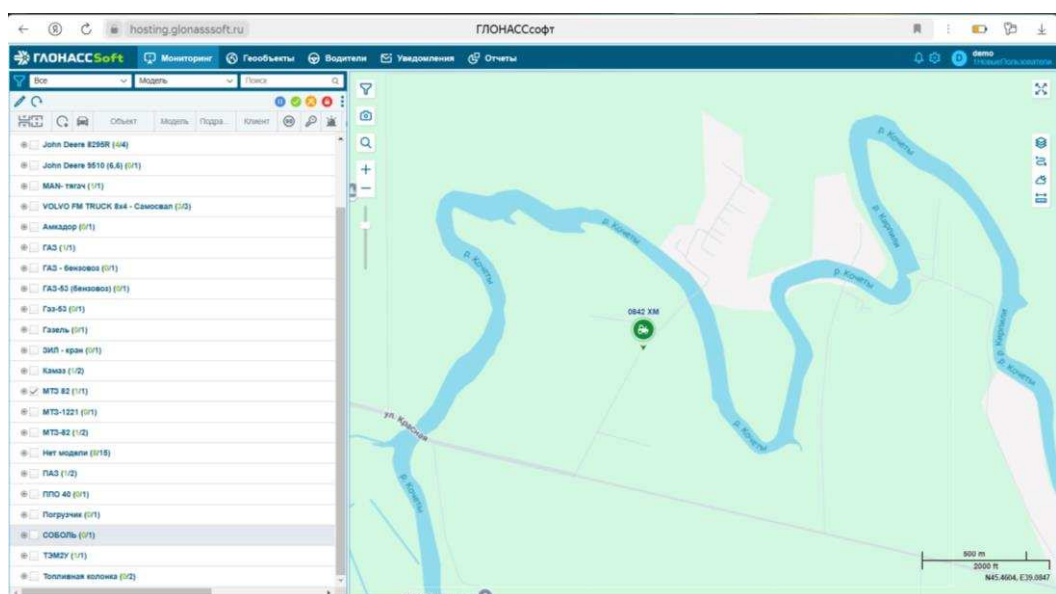


Рисунок 3.9 – Картографическое отображение в ГЛОНАССSoft

Для работы этой системы на трактор были установлены датчики: УМКа312, Omnicomm LLS 5. Которые представляют отдельные блоки передающие в систему трактора сигналы. В последующем она обрабатывается и отправляется на сервер компании ООО «ГЛОНАССSoft» с которого получили данные работы трактора с экспериментальной установкой.

Терминал УМКа312 предназначен для установки на транспортное средство в качестве дополнительного устройства, которое фиксирует местоположение, скорость и направление движения ТС.

Технические характеристики системы мониторинга УМКа312 приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики системы мониторинга УМКа312

Параметр	Значение
Поддержка систем навигации	GPS, ГЛОНАСС
Количество каналов приемника GNSS	Слежения – 33, захвата – 99
Основной канал передачи данных	GSM 850/900/1800/1900
Тип антенн	Внутренние
Интерфейсы связи с ПК	USB, Bluetooth
Количество записей в энергонезависимой памяти	10000
Диапазон напряжений аналоговых входов, В	0...40
Встроенный акселерометр	Есть
Напряжение питания, В	8...40
Потребляемый ток (при напряжении 13,8 В), мА	Средний – 35, макс. - 160
Точность определения координат, м	<2.5
Точность определения скорости, м/с	0.05
Температурный диапазон, °С	-40...+85
Масса не более, г	120

Датчик уровня Omnicomm LLS 5 применяется для определения количества светлых нефтепродуктов в резервуарах или емкостях хранения (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Изображение датчика уровня топлива Omnicomm LLS 5

Технические характеристики Omnicomm LLS 5 представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические характеристики Omnicomm LLS 5

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	7...75
Погрешность измерения в рабочей области, %	<1
Режимы работы	Аналоговый, частотный, цифровой
Степень защиты оболочки по ГОСТ 14254	IP69k
Температурный диапазон, °С	-60...+85
Потребляемая мощность, Вт	0,4

Динамометр МАW-74411 (рисунок 3.6). Динамометр предназначен для измерения сил, приложенных к объекту измерения. Краткая техническая характеристика динамометра МАW-74411 представлена в таблице 3.4.

Динамометрические данные фиксировались с помощью фотокамеры смартфона Xiaomi Redmi Note 8 в режиме видеосъемки со скоростью 60 кадров в секунду. Полученный материал обрабатывался с использованием методов математической статистики посредством программы Mathcad на компьютере под управлением Windows. В результате был составлен вариационный ряд, который обрабатывался при помощи оригинальной программы "Определение оптимальных па-

раметров рабочих органов и режима работы многофункционального средства" (приложение 5).

Таблица 3.4 – Техническая характеристика МАW-74411

Параметр прибора	Единицы и величины параметра
Цена деления	50 кГ
Интервал измерения	0 – 3000 кГ
Год выпуска	2001
Погрешность измерения, %	± 1

Полученные данные в графическом виде обрабатывались при помощи метода ординат предусматривающего деление графика на равные интервалы и проведение ординат от нулевой линии до точки пересечения с обрабатываемой кривой [37, 87].

Сушильный шкаф ШС-80-01 СПУ использовался для сушки образцов при определении влажности (гравиметрическом), твердости, плотности и коэффициента объемного сжатия грунта в лаборатории кафедры почвоведения Кубанского ГАУ (рисунок 3.11). Образцы были упакованы в просмоленные стаканчики. Образцы с зондами, упакованные в коробки, были помечены соответствующими номерами непосредственно в месте отбора проб, а затем доставлены в лабораторию для дальнейшего анализа.



Рисунок 3.11 – Изображение лабораторного стенда Кубанского ГАУ

После просушивания почвы проводилось просеивание через сита разных диаметров (рисунок 3.12) по методике [30, 95]. После просеивания каждая полученная фракция рассортировывалась по листам (рисунок 3.13) и в последующем взвешивалась на лабораторных весах ВЛКТ-2кг-М (рисунок 3.14).



Рисунок 3.12 – Общий вид набора сит для просеивания почвы



Рисунок 3.13 – Изображение образцов исследуемой почвы после просеивания

Весы лабораторные ВЛКТ-2кг-М являются высокоточным оборудованием для взвешивания веществ в различных промышленных отраслях. Результат взвешивания определяется по отсчетной шкале и счетчикам гиревого механизма и делительного устройства (рисунок 3.14). Их технические характеристики представлены в таблице 3.5.



Рисунок 3.14 – Общий вид весов лабораторных ВЛКТ-2кг-М.

Таблица 3.5 – Технические характеристики весов ВЛКТ-2кг-М

Наименование характеристик	Значение характеристик
Наибольший предел взвешивания, г	2000
Цена деления шкалы, мг	100
Интервал взвешивания по шкале, г	0 – 1000
Пределы допускаемой погрешности взвешивания по шкале, мг	$\pm 0,200$
Пределы допускаемой погрешности весов, мг	
25 – 100 мг	± 200

После каждого повторного опыта оценивали технологические характеристики обрабатываемой почвы. Оценку глыбистости обработанного участка провели по стандартной методике кригинка согласно [35, 71]. По завершении испытаний измеряли глубину обработки для последующего расчёта её равномерности (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Изображение определения равномерности глубины обработки и глыбистости

Методы определения энергетических показателей. Часовой расход топлива определили по ГЛОНАССSoft. А при помощи ГОСТ 34631-2019 [29] нашли такие параметры, как:

- поступательную скорость движения сельскохозяйственной машины;
- энергоёмкости процесса обработки почвы;
- производительность машинно-тракторного агрегата.

Экономическую оценку проводили по ГОСТ 34393-2018 [27].

3.3 Оптимизация параметров и режимов многофункционального средства при обработке почвы

Для проведения экспериментального исследования был применен симметричный композиционный план B_k , т.к. ядро этого плана является полным факторным экспериментом при этом уменьшается количество изготавливаемых для исследования значимых конструктивных элементов и повышается точность факторов на уровнях. Использовалось уравнение квадратичного типа [22, 46, 96]:

$$Y_S = b + \sum^k b_i \cdot x_j + \sum_{i < j}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum^k b_{ii} \cdot x_i^2. \quad (3.1)$$

Была разработана программа для проведения регрессионного анализа на ЭВМ под названием "Определение оптимальных параметров рабочих органов и режима работы многофункционального средства" (приложение 5), с последующей проверкой однородности дисперсии с использованием критерия Кохрена [41, 96]. По завершении эксперимента были вычислены коэффициенты регрессии [37].

Для оценки адекватности модели применялся критерий Фишера согласно методикам [1, 37]. Ошибочная дисперсия, отражающая погрешности эксперимента, определялась по [1, 37].

После получения математически адекватной модели второго порядка определяли координаты оптимума и изучали свойства поверхности отклика в окрестности этой оптимальной точки. Уравнение второго порядка приводилось к стандартной канонической форме [1]:

$$Y - Y_S = B_{11} \cdot X_1^2 + B_{22} \cdot X_{22}^2 + \dots B_{ni} \cdot X_i^2. \quad (3.2)$$

В ходе канонического преобразования исходного уравнения регрессии был выполнен поворот начальной системы координат вокруг точки S, при этом угол поворота α применялся ко всему множеству факторов. Для определения этого угла были рассчитаны частные производные всех функций отклика, приравненные к нулю, и на их основе сформирована общая система уравнений [2, 41].

После выполнения канонического преобразования и установления формы поверхности отклика, для углубленного анализа были применены двумерные сечения.

В ходе проведенных экспериментальных исследований были установлены физико-механические характеристики агрофонов (таблица 3.6), а также тяговое сопротивление предлагаемого многофункционального средства при различных углах поворота отвала и при разных скоростях, на различных глубинах обработки с учетом выбранного агрофона. Кроме того, были оценены эксплуатационные и энергетические параметры, такие как скорость движения агрегата, производительность, расход топлива и энергоемкость. Испытания проводились

в ООО «Рисоводческий племенной завод “Красноармейский” имени А. И Майстренко» поселок Октябрьский Красноармейского района Краснодарского края.

Технологические характеристики почвы, такие как влажность и твердость в выбранном районе были определены согласно методикам, описанным в разделе 3.2 и представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Условия испытаний

Показатель		Среднее значение \bar{X}	Стандартное отклонение S	Ошибка выборочной средней S_x	Коэффициент вариации V	Относительная ошибка выборочной средней, %	Абсолютная ошибка выборочной средней
Влажность почвы, %		10,289	0,223	0,071	2,167	0,685	0,168
Твердость почвы, МПа		1,66	0,091	0,029	5,477	1,732	0,069
Плотность, г/см ³	до обработки	1,289	0,012	0,004	0,932	0,295	0,009
	после обработки	1,232	0,019	0,006	1,541	0,487	0,014

Оценка испытания агрофона проводилась на черноземе по стерне озимой пшеницы. Температура воздуха составляла 26 °С.

Полевые испытания проводились на участках с ровным рельефом. Микрорельеф был слабо выражен и характеризовался продольным уклоном около 0,8 см и поперечным – примерно 1,4 см. Масса растительных и пожнивных остатков на площади в один квадратный метр составляла 125 г, при этом высота остатков достигала 11,7 см. На учетной площадке насчитывалось около 25 сорняков на квадратный метр, их средняя высота составляла 0,5 м. Предшествующим видом обработки почвы было лушение стерни.

Методика исследования почвы сухим просеиванием [95] до обработки экспериментального участка показывает высокое содержание крупных глыб почвы (> 10 мм) (таблица 3.7) в поверхностном слое почвы и весьма низкое содержание

агрономический ценных агрегатов размером 0,25–10,00 мм, а структура оценивается как неудовлетворительная [34].

Таблица 3.7 – Агрегатный анализ почвы

Вариант опыта	Размер агрегатов в мм, содержание в %						Kc	Оценка
	>10	10 – 5	5 – 3	3 – 1	1 – 0,25	<0,25		
Целина (контроль)	47,2	27,8	11,8	11,3	1,4	0,4	52,4	Удовлетворительно
ПСК-5	43,6	26,0	14,3	13,9	1,7	0,4	56,0	Удовлетворительно
Экспериментальное средство	36,0	29,0	18,3	14,8	1,4	0,4	63,5	Хорошо

Структурный анализ почвы после прохода стандартным ПСК-5 показал улучшение агрегатного состава почвы (таблица 3.7) но оценка количества ценных почвенных агрегатов осталась неудовлетворительной. После обработки снизилось количество крупных глыб до 43,75 %, но величина все равно осталась значительной, что негативно скажется на дальнейшие агротехнические мероприятия [72].

Анализ почвы после прохода модернизированным агрегатом показал снижение крупных глыб (более 10 мм) до 36,01 %, что значительно улучшает агрегатный состав почвы. По оценке количества ценных почвенных агрегатов из трех вариантов этот единственный получил оценку «хорошо», причем почти в полтора раза увеличилось количество наиболее ценных в агрономическом отношении агрегатов размером 1–5 мм [19].

Экспериментальная установка агрегатировалась с трактором МТЗ-82. Методика исследований представлена в разделе 3.2.

К ключевым факторам, оказывающим влияние на работу многофункционального средства, относятся конструктивные и режимные параметры: ширина рабочей лапы, расположение отвала, скорость движения, глубина обработки и технологические свойства почвы, такие как сопротивление почвы к деформации и разрушению, угол заточки лезвия и др. [51, 61, 68, 97].

Изучение этих факторов позволяет сделать предварительные выводы: геометрические параметры многофункционального средства были определены с учетом необходимости эффективного оборота и разрушения почвенного пласта во время работы плуга, а также минимизации сопротивления движению в почве [59].

Рассмотрев основные параметры, влияющие на тяговое сопротивление многофункционального комбинированного рабочего органа, были выбраны параметры испытаний, выбран диапазон изменения параметров, а также уровни их варьирования. Были изучены условия испытаний и процесс их проведения.

Предварительный анализ позволил выделить в качестве ключевых факторов скорость поступательного движения (v_p), угол поворота отвала (β) и глубину обработки (h), диапазоны вариации которых представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированные обозначения	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Скорость движения (v_p), км/ч	x_1	2	6	8	10
Угол поворота отвала (β), град	x_2	3	42	45	48
Глубина обработки (h), м	x_3	0,03	0,18	0,21	0,24

Другие параметры, влияющие на тяговое сопротивление многофункциональных средств для почвообработки исследовались в [6, 13, 36, 83, 66, 92].

Уровни факторов были выбраны так, чтобы теоретически рассчитанные оптимумы и существующие ограничения находились в центре интервалов варьирования [5, 21, 22].

Первый фактор (x_1), скорость перемещения рабочего органа варьировался от 6 до 10 км/ч. Численное значение скорости движения определили, зная расстояние пути прохода трактора и замером времени прохода. На тракторе постоянная скорость подбиралась включением различных передач и равномерной подачей газа.

Второй фактор (x_2), угол поворота отвала принимал значения от 42 до 48 градусов. Второй параметр фиксировался поворотным механизмом системы отвалов под определенным углом, выставленным при помощи угломера.

Третий фактор (x_3), глубина обработки изменялся в диапазоне от 0,18 до 0,24 м. Третий параметр выставлялся путем перестановки стойки в различные отверстия и при помощи регулировки по высоте опорного колеса и подкладки доски определенной толщины, чтобы учесть продавливание почвы во время эксперимента.

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Матрица планирования эксперимента при оптимизации параметров многофункционального почвообрабатывающего средства

Кодированное значение переменных			Натуральное значение переменных			Усилие, Н
			скорость движения v_p , км/ч	угол поворота отвала (β), град	глубина обработки (h), м	
x_1	x_2	x_3				
+1	+1	+1	10	48	0,24	9600
-1	+1	+1	6	48	0,24	10300
+1	-1	+1	10	42	0,24	9300
-1	-1	+1	6	42	0,24	11000
+1	+1	-1	10	48	0,18	9800
-1	+1	-1	6	48	0,18	11000
+1	-1	-1	10	42	0,18	9900
-1	-1	-1	6	42	0,18	12100
+1	0	0	10	45	0,21	7150
-1	0	0	6	45	0,21	8600
0	+1	0	8	48	0,21	8550
0	-1	0	8	42	0,21	9000
0	0	+1	8	45	0,24	7650
0	0	-1	8	45	0,18	8300

Опыты проводились согласно установленным стандартным методикам [1, 2, 18, 41, 46]. Последовательность опытов определяли с помощью таблицы случайных чисел. Итоги экспериментов по оптимизации геометрических и режимных параметров рабочего органа многофункционального средства обрабатывали со-

гласно методикам, указанным в разделе 3.2.

Полученные данные обрабатывали в Mathcad Prime 10 на ПК с Windows 10. На основе результатов формировали вариационный ряд, который анализировали методами математической статистики с использованием специализированной программы (приложение 5).

Среднее значение критерия оптимизации (отклик) вычисляли по десяти значениям, полученным в i -ом опыте. Статистические характеристики по опытам сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 – Статистические характеристики отклика по опытам

№ опыта	Среднее значение \bar{X} , Н	Стандартное отклонение S , Н	Ошибка выборочной средней S_x , Н	Коэффициент вариации, V	Относительная ошибка P , %	Абсолютная ошибка m , Н
1	9600	177,951	56,273	1,854	0,586	134,175
2	10300	188,562	59,628	1,831	0,579	142,176
3	9300	139,443	44,096	1,499	0,474	105,140
4	11000	145,297	45,947	1,321	0,418	109,554
5	9800	94,281	29,814	0,962	0,304	71,088
6	11000	141,421	44,721	1,286	0,407	106,632
7	9900	88,192	27,889	0,891	0,282	66,497
8	12100	194,365	61,464	1,606	0,508	146,551
9	7150	97,183	30,732	1,359	0,430	73,276
10	8600	100,000	31,623	1,163	0,368	75,400
11	8550	86,442	27,335	1,010	0,320	65,177
12	9000	137,437	43,461	1,527	0,483	103,627
13	7650	94,281	29,814	1,232	0,390	71,088
14	8300	91,287	28,868	1,100	0,348	68,830

Для функции отклика использовали уравнение регрессии второго порядка. Обработав экспериментальные данные, получили уравнение с мнимыми коэффициентами [54]:

$$y = 7125 - 725x_1 - 205x_2 - 325x_3 + 250x_1x_2 + 125x_1x_3 + 100x_2x_3 + 750x_1^2 + 1650x_2^2 + 850x_3^2, \quad (3.3)$$

где y – тяговое усилие, Н; x_1 – скорость движения; x_2 – угол поворота отвала; x_3 – глубина обработки.

Полученные коэффициенты регрессионного уравнения (3.3) были проверены с использованием доверительных интервалов и критерия Стьюдента. При уровне значимости ($\alpha = 0,05$) и 4 степенях свободы значение критерия составило ($t = 2,57$). Все коэффициенты значимы.

Для проверки адекватности модели использовался критерий Фишера, где расчетное значение составило 3,18, а табличное – 4,74, что подтверждает адекватность модели.

Было установлено, что при всех уровнях варьирования факторов соблюдались агротехнические требования к качеству обработки, включая крошение и равномерность глубины.

Продифференцировав уравнение (3.3) по каждой из переменных, и приравняв производные нулю, получили систему линейных уравнений [54]:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = -725 + 250x_2 + 125x_3 + 1500x_1 \\ \frac{dy}{dx_2} = -205 + 125x_1 + 100x_3 + 3300x_2 \\ \frac{dy}{dx_3} = -325 + 125x_1 + 100x_2 + 1700x_3 \end{cases} \quad (3.4)$$

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика (приложение 5): $x_1 = 0,4667$, $x_2 = 0,0221$, $x_3 = 0,1556$.

Подставив в исходное уравнение (3.3) значения x_1 , x_2 , x_3 , нашли значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика: $Y_G = 6928,3$, Н – значение критерия оптимизации.

Для более детального исследования двух факторов вблизи оптимума проводим каноническое преобразование, приняв один из факторов оптимальным и

получим поверхность отклика. Уравнение регрессии в канонической форме будет иметь вид [54]:

$$Y - 6928,3 = 750 \cdot X_1^2 + 1653,11 \cdot X_2^2 - 846,89 \cdot X_3^2, \quad (3.5)$$

где Y – значение критерия оптимизации (тяговое сопротивление многофункционального средства); X_1, X_2, X_3 – новые оси координат, которые повернуты относительно оси отклика на угол $\alpha=3,56^\circ$.

Для более детального представления о поверхности отклика поверхность отклика изучали с помощью двумерных сечений.

Рассмотрим сечение плоскостью X_1SX_2 .

Для этого в исходное уравнение (3.3) подставим $x_3 = 0,1556$. Тогда:

$$Y_{12} = 7095 - 705,55 \cdot x_1 - 189,44 \cdot x_2 + 250 \cdot x_1 \cdot x_2 + 750 \cdot x_1^2 + 1650 \cdot x_2^2, \quad (3.6)$$

где Y_{12} – тяговое сопротивление рабочего органа при взаимодействии 1 и 2 фактора, 3-й фактор в центре плана.

Выполняя каноническое преобразование и решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика: $x_1 = 0,4667$, $x_2 = 0,0221$.

Подставляя найденные значения x_1, x_2 в уравнение (3.3), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, $x_3 = 0,1556$, при этом величина отклика составила $Y_{S12} = 6928,3$ Н. Угол поворота новых осей в факторном пространстве относительно начальных равен $-7,76$ градусов, а коэффициенты уравнения в канонической форме равны: $B_{11} = 732,96$, $B_{22} = 1667,03$ (приложение 5).

Уравнение регрессии в канонической форме примет вид [54]:

$$Y_{12} - 6928,3 = 732,96 \cdot X_1^2 + 1667,03 \cdot X_2^2. \quad (3.7)$$

Поверхность отклика (рисунок 3.16) является эллиптический параболоид, а ее центр – экстремум (рисунок 3.17), поскольку коэффициенты имеют одинаковые знаки. В данной паре взаимодействия факторов более существенное влияние на отклик оказывает угол поворота отвала [54].

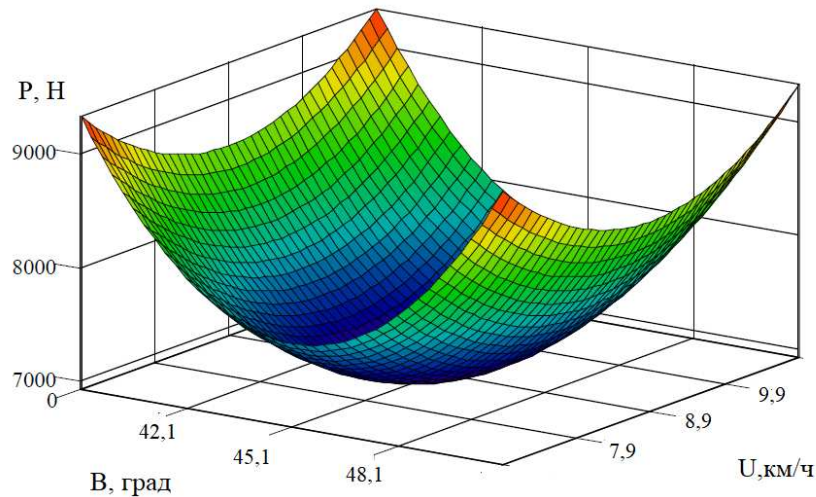


Рисунок 3.16 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления от скорости движения и угла поворота отвала

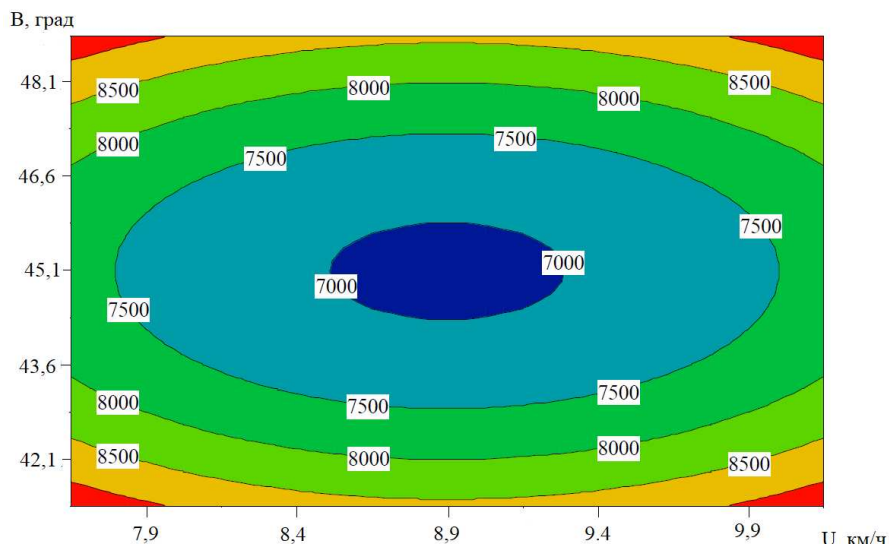


Рисунок 3.17 – Двухмерное сечение поверхности отклика зависимости тягового сопротивления от скорости движения и угла поворота отвала.

Далее рассмотрим влияние интервалов варьирования факторов x_1 (скорость движения) и x_3 (глубина обработки) на величину отклика при постоянном факторе x_2 (угол поворота отвала). Для этого в исходное уравнение (3.3) подставим $x_2 = 0,0221$. Уравнение принимает вид [54]:

$$Y_{13} = 7121 - 719,47 \cdot x_1 - 322,79 \cdot x_3 + 125 \cdot x_1 \cdot x_3 - 750 \cdot x_1^2 - 850 \cdot x_3^2. \quad (3.8)$$

Выполнив канонические преобразования и решив систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика ($x_1=0,4667$, $x_3=-0,1556$).

Подставив найденные значения x_1 и x_3 в уравнение (3.3) и определив значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда остальные факторы фиксированы соответственно в точках центра поверхности отклика ($x_1=0,4667$, $x_3=-0,1556$) получили значение отклика Y_{S13} равное 6928,3 Н.

Угол поворота новых осей α в факторном пространстве относительно начальных равен $-25,67$ градусов, а коэффициенты регрессии в канонической форме равны: $B_{11} = 719,96$, $B_{33} = 880,04$ (приложение 5).

Уравнение регрессии в канонической форме имеет вид [54]:

$$Y_{13} - 6928,3 = 719,96 \cdot X_1^2 - 880,04 \cdot X_3^2. \quad (3.9)$$

Поверхность отклика (рисунок 3.18) является эллиптический параболоид, а ее центр – экстремум (рисунок 3.19), поскольку коэффициенты имеют одинаковые знаки. В данной паре взаимодействия факторов более существенное влияние на отклик оказывает глубина обработки, т.к. $B_{33} > B_{11}$ [54].

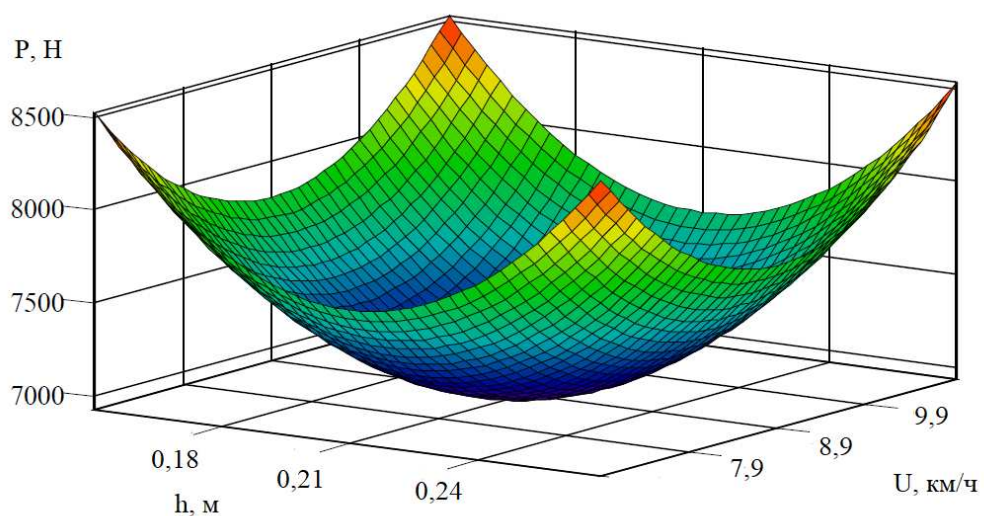


Рисунок 3.18 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления от глубины обработки и скорости движения

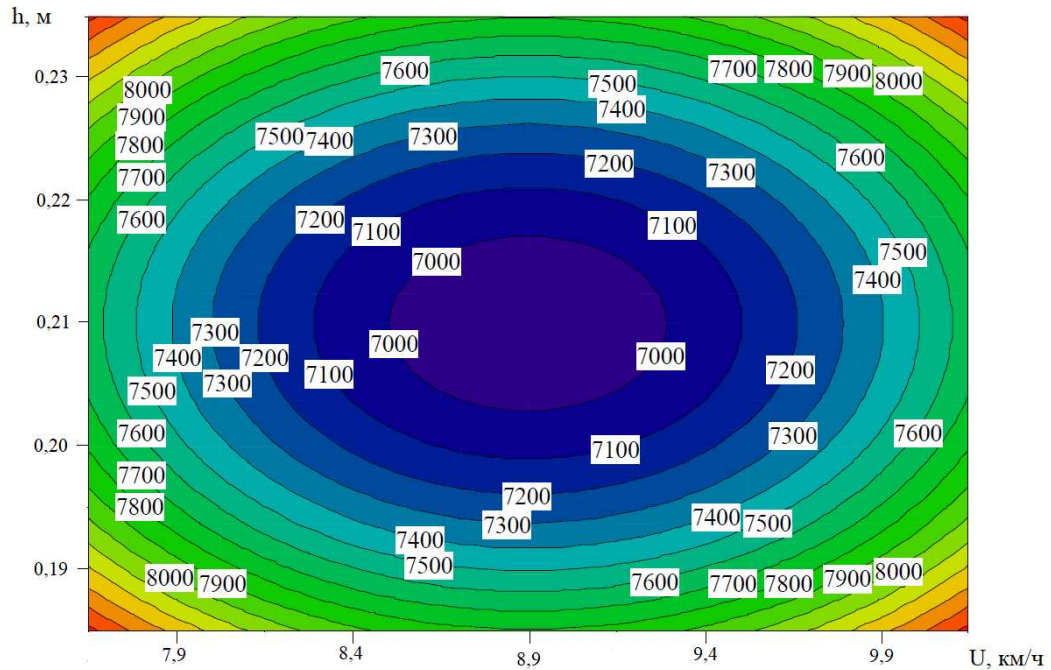


Рисунок 3.19 – Двухмерное сечение поверхности отклика тягового сопротивления от глубины обработки и скорости движения

Рассмотрим влияние интервалов варьирования факторов x_2 (угол поворота отвала) и x_3 (глубины обработки) на величину отклика при постоянном факторе x_1 (скорость движения). Для этого в исходное уравнение (3.3) подставим $x_1 = 0,4667$. Уравнение принимает вид [54]:

$$Y_{23} = 6950 + 88,33 \cdot x_2 - 266,66 \cdot x_3 - 100 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1650 \cdot x_2^2 - 850 \cdot x_3^2. \quad (3.10)$$

Выполнив канонические преобразования и решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика ($x_2 = 0,0221$; $x_3 = 0,1556$). Подставили найденные значения x_2 и x_3 в уравнение (3.10) и определили значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда остальные факторы фиксированы, соответственно, в точках центра поверхности отклика получили значение отклика $Y_{S_{23}}$ равное 6928,3 Н.

Угол поворота новых осей в факторном пространстве относительно начальных равен $-25,67$ градусов, а коэффициенты регрессии в канонической форме равны: $B_{22} = 1653,11$, $B_{33} = 846,89$ (приложение 5).

Уравнение регрессии в канонической форме примет вид [54]:

$$Y_{23} - 6928,3 = 1653,11 \cdot X_2^2 + 846,89 \cdot X_3^2. \quad (3.11)$$

Поверхность отклика (рисунок 3.20) является эллиптический параболоид, а ее центр – экстремум (рисунок 3.21), поскольку коэффициенты имеют одинаковые знаки. В данной паре взаимодействия факторов более существенное влияние на отклик оказывает угол поворота отвала т.к. $B_{22} > B_{33}$ [54].

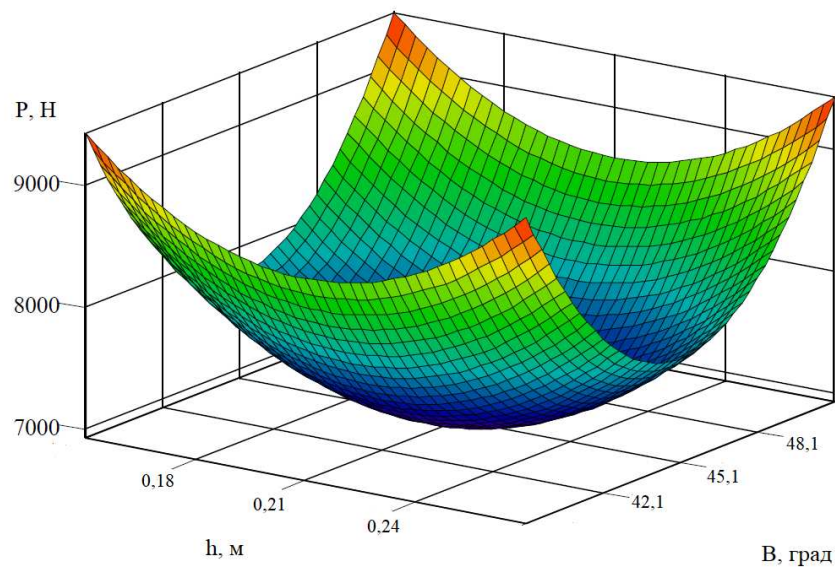


Рисунок 3.20 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления от глубины обработки и угла поворота отвала

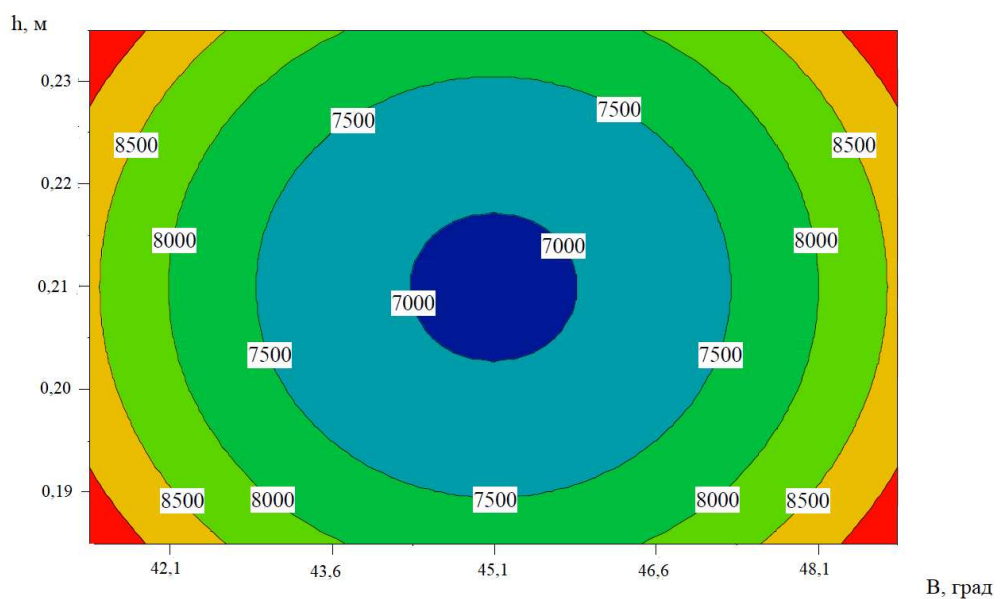


Рисунок 3.21 – Двухмерное сечение поверхности отклика тягового сопротивления от глубины обработки и угла поворота отвала

Каноническое преобразование экспериментальной модели многофункционального средства, полученной применением симметричного композиционного плана типа B_k [5, 35], исходя из условия функции цели, что Y_S стремится к минимуму, показало, что середины интервалов варьирования исследуемых факторов имеют новые значения в кодированном виде: $x_1 = 0,4667$, $x_2 = 0,0221$, $x_3 = 0,1556$ и переведенные в натуральный вид. Принимаем оптимальные параметры рабочего органа многофункционального средства [53]:

- оптимальная скорость движения $v_p = 8,9$ км/ч;
- оптимальный угол поворота отвала $\beta = 45^\circ$;
- оптимальная глубина обработки $h = 0,21$ м.

3.4 Сравнение результатов испытаний многофункционального средства и теоретических исследований

Полученные экспериментальные данные тягового сопротивления вошли в область теоретических значений, тем самым подтверждая адекватность полученных аналитических зависимостей. Из ранее проведенных исследований были взяты оптимальные параметры экспериментального рабочего органа многофункционального средства: оптимальный угол поворота отвала $\beta = 45^\circ$, оптимальная глубина обработки $h = 0,21$ м, а скорость движения варьировалась от 8 до 10 км/ч.

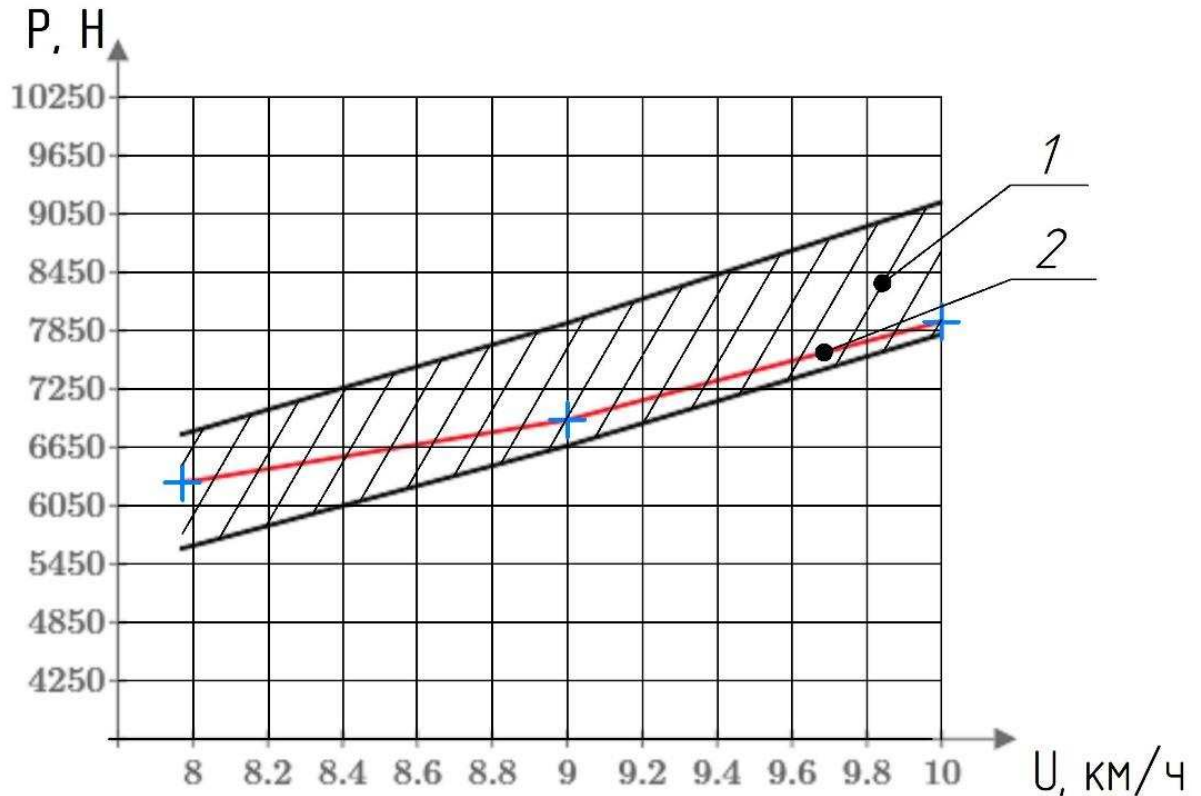
При помощи формулы (2.106), полученной из теоретического обоснования, была найдена область тягового сопротивления почвообрабатывающего средства при разных скоростях движения и глубинах обработки.

Экспериментальные исследования проводились по стерне. Испытания выполнены на трех скоростях и при оптимальной глубине обработки в трехкратной повторности. Была определена наименьшая существенная разница (НСР) для выбранных параметров.

Экспериментальная кривая зависимости тягового сопротивления от скорости при остальных постоянных оптимальных величинах имеет вид:

$$y = 195,5x^2 - 2644,5x + 15136. \quad (3.12)$$

Сопоставим область тягового сопротивления, найденную из (2.106) с экспериментальной кривой (рисунок 3.22).



1 – теоретическая область; 2 – экспериментальная кривая

Рисунок 3.22 – График зависимости тягового сопротивления от рабочей скорости

Сравнение результатов теоретических исследований и экспериментальных данных по тяговому сопротивлению из рисунка 3.22 показало, что в области оптимальных значений параметров и режима работы экспериментального multifunctional средства (угле поворота отвала 45° , глубине обработки 0,21 м и скорости 8–10 км/ч) расхождение не превышает 7 %. Анализируя рисунок 3.22, следует, что экспериментальная кривая входит в область теоретических исследований, тем самым доказывая адекватность теоретических исследований.

3.5 Выводы по главе

1. Установлены оптимальные параметры, режимы работы рабочего органа многофункционального средства с учетом конструктивных особенностей. Факторы приняли следующие значения:

- оптимальная скорость движения $v_p = 8,9$ км/ч;
- оптимальный угол поворота отвала $\beta = 45^\circ$;
- оптимальная глубина обработки $h = 0,21$ м;
- величина горизонтальной составляющей силы сопротивления почвы составила 6928,3 Н.

2. Составлена матрица планирования симметричного композиционного плана по типу B_k .

3. В результате эксперимента получена модель процесса обработки почвы, позволяющая определять конструктивные параметры разрабатываемых многофункциональных комбинированных рабочих органов и модернизируемых многофункциональных почвообрабатывающих средств.

4. Анализ представленных нами зависимостей (рисунки 3.16–3.21) показывает степень влияния скорости движения рабочего органа, глубины обработки, угла поворота отвала на тяговое сопротивление.

5. Сравнение результатов теоретических исследований и экспериментальных данных по тяговому сопротивлению показало, что в области оптимальных значений параметров и режима работы экспериментального многофункционального средства (угле поворота отвала 45° , глубине обработки 0,21 м и скорости 8–10 км/ч) расхождение не превышает 7 %.

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Оценка экономической эффективности от внедрения предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства

Расчеты по экономической эффективности разработанного многофункционального средства проводились в соответствии с методикой [8, 48, 49], утвержденной Министерством сельского хозяйства и продовольствия России (ГОСТ 34393-2018 – Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки) [27] путем наложения расчетов на опытные данные, полученные в ООО «Рисоводческий племенной завод «Красноармейский» имени А. И Майстренко» поселок Октябрьский Красноармейского района Краснодарского края, где испытывалось предлагаемое средство.

Экономическая эффективность предлагаемого средства с оптимальными параметрами определялась на обработке стерневого фона после уборки озимой пшеницы. Ширина захвата средства составляла 3,2 м, рабочая скорость движения 9 км/ч, потребная мощность двигателя трактора 120 кВт при глубине обработки 20 см. Для агрегатирования принят трактор Т-150К с эксплуатационной мощностью двигателя 176 кВт.

Базовый вариант включал ПСК-5 в агрегате с трактором Т-150К с эксплуатационной мощностью двигателя 176 кВт при работе на той же скорости и глубине обработки почвы.

Рассчитаем затраты на модернизацию машины ПЧН-3.2. В перечень материалов входят: отвалы, кронштейны, труба круглая, профиль квадратный, гидроцилиндр. А также в модернизацию входят сварочные и слесарные работы (таблица 4.1). Модернизация машины займет два месяца, потребуется коллектив из двух человек, занимающихся сварочными и слесарными работами, каждый месяц они будут работать согласно штатному расписанию с окладом в 35 тыс. руб.

Качество обработки оценивали согласно ГОСТ 20915-2011 [25].

Таблица 4.1 – Общие расходы затраченные на модернизацию ПЧН-3.2

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Кол -во	Итого, тыс. руб.
1	Гидроцилиндр ЦГ-50.30х400.11-04	шт.	1	15,2
2	Отвал плуга ППО левый	шт.	7	50,4
3	Отвал плуга ППО правый	шт.	7	50,4
4	Труба бесшовная горячедеформированная 110х3	п.м.	4	4,6
5	Труба профильная 40х40х2	п.м.	8	1,2
6	Итого материальные затраты на всю модернизацию	шт.	1	121,8
7	Заработная плата	чел.	2	140
8	Расходные материалы			25
9	Энергозатраты			15
10	Итого			301,8

Понижилась балансовая стоимость средства для отвальной и безотвальной вспашки (ПСК-5 стоил 2255 тыс. р, а ПЧН-3.2М обошелся в 1350 тыс. р).

В качестве критерия экономической оценки был выбран показатель – минимальная совокупная величина прямых эксплуатационных расходов на обработку почвы средством при выращивании зерновых культур. Данный критерий отражает основной показатель хозяйствования в условиях рыночной экономики – максимальную величину чистой прибыли или чистого дохода [69].

Рассчитаем основные технико-экономические показатели при использовании обоих средств и сравним их (таблица 4.2).

Производительность средства за час сменного времени:

$$W = 0,1 \cdot B \cdot V \cdot E, \quad (4.1)$$

где B – ширина захвата средства, м; V – средняя скорость движения средства, км/ч; E – коэффициент использования сменного времени.

Затраты труда (трудоемкость операции) определяли по формуле:

$$H_y = \frac{L}{W_q}, \quad (4.2)$$

где L – количество обслуживающих средств механизаторов, чел.; W_q – часовая производительность средства), га/ч.

Эксплуатационные затраты определяем по формуле:

$$З^э = C^з + C^a + C^{рто} + C^{ТСМ} + C^{пр}, \quad (4.3)$$

где $C^з$ – затраты на оплату труда с отчислениями на социальные нужды, руб./га; C^a – амортизационные отчисления, руб./га; $C^{рто}$ – отчисления на ремонты и техобслуживание, руб./га; $C^{ТСМ}$ – затраты на топливо и смазочные материалы, руб./га; $C^{пр}$ – прочие прямые затраты, руб./га.

Оплата труда с отчислениями на социальные нужды:

$$C^з = \left(\frac{m_q^M \cdot l^M}{W} \cdot K_M + \frac{m_q^{BP} \cdot l^{BP}}{W} \cdot K_{BP} \right) \cdot K_{соц}, \quad (4.4)$$

где m_q^M , m_q^{BP} – часовые тарифные ставки механизатора и вспомогательных рабочих соответственно, руб./ч; l^M , l^{BP} – количество механизаторов и вспомогательных рабочих, обслуживающих агрегат, чел.; K_M , K_{BP} – коэффициенты доплат к тарифному фонду механизаторов и вспомогательных рабочих (1,25 и 1,1 соответственно); $K_{соц}$ – коэффициент отчислений на социальные нужды (с 2011 года $K_{соц} = 0,34$).

Амортизационные отчисления равны:

$$C^a = \frac{K_T \cdot a_T}{100 \cdot T_{г.т} \cdot W_q} + \frac{K_{ср} \cdot a_{ср}}{100 \cdot T_{г.см} \cdot W_q} + \frac{K_{сц} \cdot a_{сц}}{100 \cdot T_{г.сц} \cdot W_q}, \quad (4.5)$$

где K_T , $K_{ср}$, $K_{сц}$ – балансовая стоимость трактора, почвообрабатывающего средства и сцепки соответственно, руб.; a_T , $a_{ср}$, $a_{сц}$ – годовая норма амортизационных отчислений на трактор, сельхозмашину и сцепку соответственно, %;

$T_{г.т}$, $T_{г.ср}$, $T_{г.сц}$ – нормативная загрузка трактора, почвообрабатывающего средства и сцепки, ч/год.

Затраты на ремонты и техническое обслуживание рассчитываются по формуле:

$$C^{рто} = \frac{K_T \cdot p_T}{100 \cdot T_{г.т} \cdot W_{ч}} + \frac{K_{см} \cdot p_{ср}}{100 \cdot T_{г.ср} \cdot W_{ч}} + \frac{K_{сц} \cdot p_{сц}}{100 \cdot T_{г.сц} \cdot W_{ч}}, \quad (4.6)$$

где p_T , $p_{ср}$, $p_{сц}$ – годовая норма отчислений на ремонты и техническое обслуживание для трактора, почвообрабатывающего средства и сцепки соответственно, %.

Затраты на топливо и смазочные материалы определяли по формуле:

$$C^{ТСМ} = g \cdot Z_k, \quad (4.7)$$

где g – норма расхода топлива, кг/га; Z_k – комплексная цена ТСМ, руб./кг (65 руб за 1 кг).

Прочие прямые затраты определяли как 4 % от оплаты труда с отчислениями на социальные нужды:

$$C^{пр} = 0,04 \cdot C^3, \quad (4.8)$$

Одним из основных показателей экономической эффективности предлагаемых инженерных решений является ожидаемый годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_r = \Delta П, \quad (4.9)$$

где \mathcal{E}_r – общий годовой экономический эффект, руб.; $\Delta П$ – годовая экономия от сокращения приведенных затрат, руб.

$$\Delta П = (P_y^c - P_y^n) \cdot Q_r^n, \quad (4.10)$$

где P_y^c , P_y^n – приведенные затраты по существующему и проектируемому вариантам, руб.; Q_r^n – годовая выработка почвообрабатывающего средства в проектируемом варианте, га.

$$Q_{\Gamma}^{\Pi} = W_{\text{ч}} \cdot T_{\Gamma.\text{с.м}}, \quad (4.11)$$

Приведенные затраты определяли по формуле:

$$\Pi_{\text{у}} = Z^{\text{э}} + E \cdot K_{\text{у}}, \quad (4.12)$$

где $Z^{\text{э}}$ – эксплуатационные затраты, руб./га; E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (для сельхозпредприятий $E = 0,15$); $K_{\text{у}}$ – капиталовложения, руб./га.

Удельные капиталовложения рассчитывали по формуле:

$$K_{\text{у}} = \frac{K_{\Gamma}}{T_{\Gamma.\text{т}} \cdot W_{\text{ч}}} + \frac{K_{\text{с.м}}}{T_{\Gamma.\text{с.м}} \cdot W_{\text{ч}}} + \frac{K_{\text{с.ц}}}{T_{\Gamma.\text{с.ц}} \cdot W_{\text{ч}}}. \quad (4.13)$$

Удельную материалоемкость (металлоемкость) рассчитывали по формуле:

$$M_{\text{у}} = \frac{M_{\Gamma}}{T_{\Gamma.\text{т}} \cdot W_{\text{ч}}} + \frac{M_{\text{с.м}} \cdot N_{\text{с.м}}}{T_{\Gamma.\text{с.р}} \cdot W_{\text{ч}}} + \frac{M_{\text{с.ц}}}{T_{\Gamma.\text{с.ц}} \cdot W_{\text{ч}}}, \quad (4.14)$$

где M_{Γ} , $M_{\text{с.р}}$, $M_{\text{с.ц}}$ – масса трактора, почвообрабатывающего средства и сцепки соответственно, кг.

Удельную энергоемкость операции определяли по формуле:

$$A_{\text{у}} = \frac{N_{\text{дв}}}{W_{\text{ч}}}, \quad (4.15)$$

где $N_{\text{дв}}$ – эффективная мощность двигателя, кВт.

Срок окупаемости определяли по формуле:

$$E_{\text{ок}} = \frac{\Delta\Pi}{\text{Э}_{\Gamma}}. \quad (4.16)$$

В таблице 4.2 представлены технико-экономические показатели работы базового варианта и проектируемого варианта почвообрабатывающего средства.

Таблица 4.2 – Показатели экономической эффективности

№ п/п	Статьи затрат	Базовый вариант Т-150К + ПСК-5	Новый модернизированный вариант	% нового варианта к базовому
1	Затраты труда, чел.-ч/га	0,42	0,38	-7,69
2	Производительность агрегата, га/ч	2,40	2,60	8,33
3	Эксплуатационные затраты, руб./га	3297,44	2274,67	-31,02
4	Капиталовложения, руб./га	5525,00	3360,32	-40,26
5	Металлоемкость, кг/га	5,05	4,85	-4,09
6	Удельная энергоёмкость, МДж/га	41,67	38,46	-7,69

4.2 Выводы по главе

В результате оценки и анализа технико-экономических показателей разработанного многофункционального средства с ПСК- 5, были получены следующие результаты:

- проведена экономическая оценка эффективности использования предлагаемого многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой

- использование предлагаемого многофункционального средства в технологическом процессе по основной обработке почвы под зерновые позволило снизить эксплуатационные затраты на 15,3%, снизить капиталовложения на 40,3% при этом получить годовой экономический эффект в размере 12250 руб./га. Срок окупаемости составил 1,64 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана конструктивно-технологическая схема многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом. Новизна технического решения подтверждена патентами РФ на полезные модели № 225628 и № 229905.

2. Получены аналитические зависимости величины тягового сопротивления, позволяющие определить основные конструктивные параметры и режимы работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой: скорость движения (от 6 до 10 км/ч), угол поворота отвала (от 43° до 47°), глубина обработки почвы (от 18 до 24 см), угол заточки лезвия, траекторию движения пласта почвы.

В результате проведенных расчетов были получены следующие значения тягового сопротивления в зависимости от скорости движения многофункционального почвообрабатывающего средства. При скорости от 6 до 10 км/ч тяговое сопротивление рабочего органа многофункционального средства составило от 3590 до 9250 Н. При глубине обработки от 18 до 24 см и постоянной скорости усилие резания пласта лапой составило от 2100 до 2750 Н.

3. В результате реализации плана трехфакторного эксперимента были получены оптимальные параметры, режим работы многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрелчатой лапой: скорость движения – 8,9 км/ч, угол поворота отвала – 45 градусов, при глубине обработки – 0,21 м. При этих значениях тяговое сопротивление составило 6928 Н.

4. Сравнение результатов теоретических исследований и экспериментальных данных по тяговому сопротивлению показало, что в области оптимальных значений параметров и режима работы экспериментального многофункционального

нального средства (угле поворота отвала 45° , глубине обработки 0,21 м и скорости 8–10 км/ч) расхождение не превышает 7 %.

5. Использование предлагаемого многофункционального средства в технологическом процессе по основной обработке почвы под зерновые позволило снизить эксплуатационные затраты на 15,3 %, снизить капиталовложения на 40,3 % при этом получить годовой экономический эффект в размере 12250 руб./га. Срок окупаемости составил 1,64 года.

Рекомендации производству

Предложенная в работе конструкция многофункционального почвообрабатывающего средства с подвижной системой отвалов и стрельчатой лапой, сочетающего возможности безотвальной или отвальной обработки почвы челночным способом может быть использована конструкторскими организациями при разработке средств для основной обработки почвы под зерновые культуры.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее совершенствование предложенной конструктивно-технологической схемы многофункционального почвообрабатывающего средства для основной обработки под зерновые культуры должно происходить путем усовершенствования под пропашные культуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, В. А. Введение в планирование эксперимента / В. А. Адлер. – Москва : Metallurgia, 1999. – 159 с.
2. Адлер, В. А. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / В. А. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1971. – 221 с.
3. Ан, С. И. К вопросу об агротехнологических особенностях и преимуществах безотвальной вспашки почвы / С. И. Ан, А. Ю. Николенко // Образование, наука и инновации: современные вызовы : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. В 2-х ч. МелГУ, 12–13 декабря 2024 года. – Мелитополь, 2025. – С. 902–905.
4. Анализ использования пахотных агрегатов для отвальной вспашки / Г. Г. Маслов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 5 (85). – С. 108–114.
5. Асатурян, В. И. Теория планирования эксперимента : учеб. пособие / В. И. Асатурян. – Москва : Радио и связь, 1983. – 248 с.
6. Башмаков, И. А. Разработка навесного секционного плуга с изменяемой шириной захвата для агрегатирования с тракторами мощностью 200–250 кВт : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Башмаков Игорь Андреевич. – Саратов, 2021. – 128 с.
7. Белоусов, С. В. Параметры и технологические режимы работы отвального плуга с дополнительными плоскорежущими рабочими органами : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Белоусов Сергей Витальевич. – Ростов-на-Дону, 2020. – 234 с.
8. Бершицкий, Ю. И. Экономическая эффективность конструкторской части дипломных проектов, выполняемых на факультете механизации : метод. указания / Ю. И. Бершицкий, Ю. К. Кастиди. – Краснодар : КубГАУ, 2014. – 18 с.
9. Бледных, В. В. Рабочий орган культиватора-плоскореза-глубокорыхлителя с переменным углом резания / В. В. Бледных, П. Г. Свечников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – № 5. – С. 18–29.

10. Бойков, В. М. Механико-техническое обоснование эффективных способов и технических средств основной обработки почвы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Бойков Василий Михайлович. – Саратов, 1998. – 370 с.

11. Бойкова, Е. В. Разработка энергосберегающего технологического процесса основной обработки почвы и плуга общего назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Бойкова Елена Васильевна. – Саратов, 2010. – 164 с.

12. Борисенко, И. Б. Основная обработка почв модернизированными чизельными орудиями / И. Б. Борисенко, А. Е. Новиков, М. А. Садовников // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 5. – С. 27–32.

13. Борисенко, И. Б. Развитие чизельных почвообрабатывающих орудий и их теоретическое обоснование / И. Б. Борисенко, В. И. Пындак, А. Е. Новиков // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2021. – № 2. – С. 12–19.

14. Борисенко, П. И. Совершенствование технологического процесса чизелевания за счет применения рабочего органа для минимальной обработки почвы с полосным углублением : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Борисенко Павел Иванович. – Волгоград, 2016. – 190 с.

15. Брусенцов, А. С. Исследование напряженного состояния рамы пропашного культиватора в процессе работы / А. С. Брусенцов, В. А. Дробот, А. Ю. Николенко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 4(32). – С. 109–120.

16. Будылова, В. Д. Методы расчета и оптимизации напряженно-деформированного состояния стойки оборотного плуга / В. Д. Будылова, В. Н. Путилина, А. Ю. Николенко // Инновационные научные исследования. Актуальные вопросы и решения : материалы Международной научно-практической конференции, ИП Алзидан, 27 ноября 2025 года. – Краснодар, 2025. – С. 65–75.

17. Веретенников, А. Н. Сравнительный анализ оборотного плуга с безотвальным плугом / А. Н. Веретенников, А. Ю. Николенко // Молодая аграрная наука : материалы Международной научно-практической конференции, 16 мая 2024 года. – Майкоп : Изд-во «Магарин Олег Григорьевич», 2024. – С. 93–96.

18. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – Москва : Статистика, 1974. – 192 с.
19. Воронин, А. Д. Основы физики почв / А. Д. Воронин. – Москва : МГУ, 1986. – 214 с.
20. Высоцкий, А. А. Динамометрирование сельскохозяйственных машин / А. А. Высоцкий. – Москва : Машиностроение, 1968. – 291 с.
21. Гасс, С. Линейное программирование (методы и приложения) / С. Гасс.; пер. с англ. – Москва : Физматгиз, 1961. – 304 с.
22. Голикова, Т. И. Свойства D-оптимальных планов и методы их построения / Т. И. Голикова, Н. Г. Микешина // Новые идеи в планировании эксперимента. – Москва : Наука, 1969. – С. 21–58.
23. Горячкин, В. П. Собрание сочинений. Т. 1. / В. П. Горячкин. – Москва : Колос, 1968. – 455 с.
24. Горячкин, В. П. Собрание сочинений. Т. 2. / В. П. Горячкин. – Москва : Колос, 1968. – 720 с.
25. ГОСТ 20915–2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. – Введ. 01.01.2013. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 27 с.
26. ГОСТ 33736–2016. Техника сельскохозяйственная. Машины для глубокой обработки почвы. Методы испытаний. – Введ. 01.01.2018. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 61 с.
27. ГОСТ 34393–2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – Введ. 20.12.2019. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 17 с.
28. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 01.04.2016. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 23 с.
29. ГОСТ Р 34631–2019. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. – Введ. 20.12.2019. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 13 с.
30. ГОСТ Р 58595–2019. Почвы. Отбор проб. – Введ. 10.10.2019. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 8 с.

31. Грибановский, А. П. Комплекс противэрозионных машин (теория, проектирование) / А. П. Грибановский, Р. В. Бидлингмайер. – Алма-Ата : Кайнар, 1990. – 256 с.
32. Гячев, Л. В. Теория лемешно-отвальной поверхности / Л. В. Гячев // Труды Азово-Черноморского института механизации сельского хозяйства. – зерноград, 1961. – Вып. 13. – 317 с.
33. Далин, А. Д. Исследование по резанию грунтов плужными и фрезерными ножами / А. Д. Далин // Резание грунтов. – Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1950.
34. Долгов, С. И. Структура черноземных почв и основные особенности систем их механической обработки / С. И. Долгов, И. В. Кузнецова // Научные труды Курской сельскохозяйственной опытной станции. – 1969. – Т. 3. – С. 50–62.
35. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – Москва : Колос, 1979. – 200 с.
36. Доценко, А. Е. Совершенствование технологического процесса глубокой обработки почвы за счет разработки комбинированного рабочего органа : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Доценко Алексей Евгеньевич. – Волгоград, 2017. – 166 с.
37. Завалишин, Ф. С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф. С. Завалишин, М. Г. Мациев. – Москва : Колос, 1982. – 259 с.
38. Иофинов, С. А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С. А. Иофинов, Г. П. Лышко. – Москва : Колос, 1984. – 351 с.
39. Исаченко, К. Е. Сравнение отечественных и зарубежных машин для глубокого рыхления без оборота пласта / К. Е. Исаченко, А. Ю. Николенко // Молодая аграрная наука : материалы Международной научно-практической конференции, 16 мая 2024 года. – Майкоп, Изд-во «Магарин Олег Григорьевич», 2024. – С. 186–188.
40. Исходные требования на базовые машинные технологические операции в растениеводстве / В. П. Елизаров, Н. М. Антышев, В. М. Бейлис [и др.] ;

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное агентство по сельскому хозяйству. – Москва : Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2005. – 270 с.

41. Кассандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – Москва : Наука, 1970. – 224 с.

42. Ковриков, И. Т. Основные направления совершенствования технологий обработки почвы и средств механизации, их осуществления / И. Т. Ковриков, А. А. Митин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2004. – № 2(2). – С. 35–37.

43. Комбинированное почвообрабатывающее орудие на базе чизельного плуга-рыхлителя / А. Ю. Несмиян, А. Г. Арженовский, С. В. Асатурян [и др.] // Сельский механизатор. – 2023. – № 9. – С. 4–6

44. Кузьмин, В. В. Параметры и режимы работы комбинированного агрегата для гладкой вспашки под зерновые колосовые культуры : дис. ... канд. техн. наук : 4.3.1. / Кузьмин Виталий Викторович. – Краснодар, 2024. – 164 с.

45. Марнов, С. В. Повышение эффективности вспашки путем использования поворотного плуга с изменяемыми параметрами : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Марнов Сергей Владимирович. – Тамбов, 2013. – 117 с.

46. Маслов, Г. Г. Оптимизация параметров и режимов работы машин методами планирования эксперимента / Г. Г. Маслов, О. Н. Дидманидзе, В. В. Цыбулевский. – Москва : ООО УМЦ «Триада», 2007. – 291 с.

47. Мет, Р. Влияние способов обработки почвы на экологию водных ресурсов при возделывании риса / Р. Мет, А. Ю. Николенко // Экология речных ландшафтов : сборник статей по материалам VIII Международной научной экологической конференции, КубГАУ, 01 декабря 2023 года. – Краснодар, 2024. – С. 228–233.

48. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. Ч. 1. – Москва : Министерство сельского хозяйства и продовольствия РФ, 1998. – 180 с.

49. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. Ч. 2. Нормативно-справочный материал. – Москва : Министерство сельского хозяйства и продовольствия РФ, 1998. – 218 с.

50. Модульное почвообрабатывающее орудие / И. Б. Борисенко, Д. В. Скрипкин, М. В. Мезникова, Д. В. Бобриков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 3(63). – С. 318–327.

51. Несмиян, А. Ю. Оценка влияния неконструктивных факторов на удельное сопротивление легкоглинистых черноземов при чизелевании / А. Ю. Несмиян, В. В. Щиров, С. М. Олдырев // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 2(46). – С. 11–17.

52. Николенко, А. Ю. Безотвальный способ вспашки почвы / А. Ю. Николенко, А. Р. Лабузов, Я. И. Дмитренко // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России : материалы IV Международной научной конференции, КрасГУ, 23–24 ноября 2023 года. – Красноярск, 2024. – С. 117–120.

53. Николенко, А. Ю. Влияние типа почвы на процесс вспашки оборотным плугом / А. Ю. Николенко, Б. Ф. Тарасенко // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А. Я. Миловича : Сборник статей, РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 03–05 июня 2024 года. – Москва, 2024. – С. 594–597.

54. Николенко, А. Ю. Конструктивные и режимные параметры многофункционального почвообрабатывающего средства / А. Ю. Николенко, Б. Ф. Тарасенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2026. – № 217. – С. 350–364.

55. Николенко, А. Ю. Обзор форм рабочих органов для глубоких рыхлений почв / Р. А. Мет, А. Ю. Николенко // Перспективы развития транспортной системы в Российской Федерации : материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, приуроченной к профессиональному празднику –

Дню работника автомобильного транспорта, РГАТУ, 25 октября 2024 года. – Рязань, 2024. – С. 243–255.

56. Николенко, А. Ю. Оценка конкурентоспособности зарубежных и отечественных оборотных плугов / А. Ю. Николенко, Р. А. Мет // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 207. – С. 129–139.

57. Николенко, А. Ю. Оценка конкурентоспособности зарубежных и отечественных оборотных плугов / А. Ю. Николенко, Р. А. Мет // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике : материалы XXIII международной научно-практической конференции, Кузбасский ГАУ, 04–05 декабря 2024 года. – Кемерово, 2024. – С. 187–193.

58. Николенко, А. Ю. Плуг-рыхлитель / А. Ю. Николенко // Современные векторы развития науки : сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, КубГАУ, 06 февраля 2024 года. – Краснодар, 2024. – С. 320–321.

59. Николенко, А. Ю. Современные тенденции в развитии сельскохозяйственной техники / А. Ю. Николенко, Б. Ф. Тарасенко // Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год : сборник трудов конференции, КубГАУ, 05 февраля 2025 года. – Краснодар, 2025. – С. 375–377.

60. Николенко, А. Ю. Универсальное почвообрабатывающее орудие / А. Ю. Николенко, Б. Ф. Тарасенко // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сборник материалов XX Международной (заочной) научно-практической конференции: в 2 кн., АГАУ, 06 февраля 2025 года. – Барнаул, 2025. – С. 127–129.

61. Николенко, А. Ю. Устройство для обработки почвы и предпосевного внесения жидких комплексных удобрений, карбамидно-аммиачной селитры / А. Ю. Николенко, Б. Ф. Тарасенко // Virtuozы науки : сборник материалов Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных за 2023 г., КубГАУ, 06–15 ноября 2023 года. – Краснодар, 2024. – С. 487–488.

62. Николенко, А. Ю. Характеристика форм рабочих элементов чизельных плугов / А. Ю. Николенко, Т. В. Манукян, А. П. Тютрин // Приднепровский научный вестник. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 74–79.

63. Николенко, А. Ю. Энергетический анализ процесса работы оборотного плуга / А. Ю. Николенко // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, КБГАУ, 22–23 декабря 2023 года. – Нальчик, 2023. – С. 212–215.

64. Николенко, А. Ю. Энергосберегающие технологии обработки почвы в условиях ведения сельскохозяйственного производства Краснодарского края / А. Ю. Николенко, В. А. Дробот // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 78-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2022 год. В 3-х частях, КубГАУ, 01 марта 2023 года / Отв. За выпуск А. Г. Коцаев. Ч. 2. – Краснодар, 2023. – С. 308–311.

65. Нуралин, Б. Н. Современная тенденция развития конструкции отвальных плугов / Б. Н. Нуралин, С. В. Олейников, М. С. Галиев // Новости науки Казахстана. – 2020. – № 2(144). – С. 74–84.

66. Обоснование энергетических параметров комбинированного почвообрабатывающего агрегата системы «Компактор» / И. В. Соболевский, В. А. Куклин, В. Н. Евдокимов [и др.] // Таврический вестник аграрной науки. – 2025. – № 2(42). – С. 262–273.

67. Обработка почвы : учеб. Пособие / Б. И. Тарасенко, А. С. Найденов, Н. И. Бардак, В. В. Терещенко. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – 176 с.

68. Оптимальные параметры плоскорезов-глубокорыхлителей / Г. С. Багиров, Х. Т. Алекперов, Х. З. Алиев [и др.] // Горное сельское хозяйство. – 2022. – № 5. – С. 9–15.

69. Осмоловский, Д. Н. Проблемы и задачи повышения инвестиционной привлекательности агропромышленного комплекса / Д. Н. Осмоловский, А. Ю. Николенко // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике : материалы XXIII Международной научно-практической

конференции, Кузбасский ГАУ, 04–05 декабря 2024 года. – Кемерово, 2024. – С. 196–199.

70. Оськин, С. В. Имитационное моделирование при формировании эффективных комплексов почвообрабатывающих агрегатов – еще один шаг к точному земледелию : монография / С. В. Оськин, Б. Ф. Тарасенко. – Краснодар : КРОН, 2015. – 292 с.

71. Оценка глыбистости поверхности почвы после отвальной вспашки методом кригинга / И. И. Максимов, А. А. Малов, В. И. Максимов, А. В. Кудряшов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 7. – С. 27.

72. Панов, И. М. Физические основы механики почв / И. М. Панов, В. И. Ветохин. – Киев : Феникс, 2008. – 266 с.

73. Пат. № 176153 U1 Российская Федерация, МПК А01В 35/20, А01В 15/02, А01В 35/28. Рабочий орган почвообрабатывающего орудия «ПСК-ЧГ» : № 2017131827 : заявл. 12.09.2017 : опубл. 10.01.2018 / Святкин С. Н. – 4 с.

74. Пат. № 2134933 С1 Российская Федерация, МПК А01В 13/14. Комбинированный почвообрабатывающий рабочий орган : № 98108514/13 : заявл. 05.05.1998 : опубл. 27.08.1999 / Путрин А. С. – 3 с.

75. Пат. № 221238 U1 Российская Федерация, МПК А01В 49/06, А01В 35/14, А01В 35/10. Устройство для обработки почвы и предпосевного внесения жидких комплексных удобрений, карбамидно-аммиачной селитры : № 2023111800 : заявл. 04.05.2023 : опубл. 26.10.2023 / Тарасенко Б. Ф., Кизинек С. В., Гаврилов В. Н. [и др.] ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 5 с.

76. Пат. № 225628 U1 Российская Федерация, МПК А01В 5/10, А01В 35/16. Плуг-рыхлитель : № 2024103804 : заявл. 14.02.2024 : опубл. 26.04.2024 / Тарасенко Б. Ф., Николенко А. Ю., Орленко С. Ю. [и др.] ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 6 с.

77. Пат. № 229905 U1 Российская Федерация, МПК А01В 49/02, А01В 35/16. Универсальное почвообрабатывающее орудие : № 2024118999 : заявл. 04.07.2024 : опубл. 01.11.2024 / Тарасенко Б. Ф., Гаврилов В. Н., Дробот В. А., Николенко А. Ю. ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 5 с.

78. Пат. № 236428 U1 Российская Федерация, МПК А01В 3/42, А01В 17/00, А01В 13/14. Обратный плуг с дреном : № 2025101190 : заявл. 30.01.2025 : опубл. 07.08.2025 / Тарасенко Б. Ф., Гаврилов В. Н., Николенко А. Ю., Дробот В. А. ; патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 6 с.

79. Пат. № 2436270 С1 Российская Федерация, МПК А01В 63/112, G01L 5/13. Полевая установка для испытаний почвообрабатывающих рабочих органов : № 2010116516/13 : заявл. 26.04.2010 : опубл. 20.12.2011 / Б. Ф. Тарасенко, Твердохлебов С. А., Богатырев Н. И. [и др.] ; заявитель федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет». – 4 с.

80. Пат. № 2490844 С1 Российская Федерация, МПК А01В 15/00, А01В 3/28. Плужный корпус : № 2012125297/13 : заявл. 18.06.2012 : опубл. 27.08.2013 / Тырнов Ю. А., Балашов А. В., Белогорский В. П., Марнов С. В. ; заявитель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов Российской академии сельскохозяйственных наук» (ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии). – 4 с.

81. Пат. № 2824826 С1 Российская Федерация, МПК А01В 49/06. Устройство для предпосевной обработки рисовых чеков : № 2024106211 : заявл. 05.03.2024 : опубл. 14.08.2024 / Тарасенко Б. Ф., Богатырев Н. И., Гаврилов В. Н. [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина». – 5 с.

82. Пащенко, В. Ф. Теория воздействия рабочих органов орудий на почву : монография / В. Ф. Пащенко, С. И. Корниенко, Н. П. Гусаренко. – Харьков : ХНАУ, 2013. – 89 с.

83. Поиск оптимальных режимов функционирования рабочего органа чизеля / И. В. Божко, Г. Г. Пархоменко, С. И. Камбулов [и др.] // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2025. – Т. 55, № 10(323). – С. 100–108.

84. Примаков, Н. В. Энергосберегающая технология подготовки почвы для закладки плодового сада / Н. В. Примаков, А. Ю. Николенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2022. – № 183. – С. 234–242.

85. Продуктивность зерновых культур при различных способах обработки почвы / Р. Л. Акчурин, И. О. Чанышев, Р. К. Нафиков, А. А. Низаева // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – Т. 33, № 8. – С. 14–17.

86. Протокол испытаний импортного полунавесного плуга Lemken евро диамант 10 / М-во сельского хозяйства Рос. Федерации, ФГБУ Кубанская государственная машиноиспытательная станция. – Протокол испытаний от 23.11.2015 № 07-111-2015 (5010142). – 28 с.

87. Протокол испытаний полунавесного поворотного плуга ППП-6х45 / М-во сельского хозяйства Рос. Федерации, ФГБУ Кубанская государственная машиноиспытательная станция. – Протокол испытаний от 09.12.2019 № 07-96-2019 (5010172). – 6 с.

88. Протокол испытаний скоростного комбинированного навесного плуга ПСКУ-5 / М-во сельского хозяйства Рос. Федерации, ФГБУ Северо-Кавказская государственная зональная машиноиспытательная станция. – Протокол испытаний от 23.11.2020 № 11-23-20 (5010222). – 4 с.

89. Пустыльник, Е. Н. Статические методы анализа и обработки наблюдений / Е. Н. Пустыльник. – Москва : Наука, 1968. – 288 с.

90. Путрин, А. С. Основы проектирования рабочих органов для рыхления почв, находящихся за пределами физически спелого состояния : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Путрин Александр Сергеевич. – Оренбург, 2003. – 460 с.

91. Рахимов, Р. С. Обоснование параметров чизельного рабочего органа для обработки каменистых почв / Р. С. Рахимов, А. А. Драничников // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 5. – С. 73–76.

92. Результаты полевых испытаний компактора предпосевного КП-7,2 «Крым» / И. В. Соболевский, В. А. Куклин, В. Н. Евдокимов, И. В. Голиков // Таврический вестник аграрной науки. – 2025. – № 4(44). – С. 188–200.

93. Результаты экспериментальных исследований прицепного плугарыхлителя в агрегате с трактором мощностью 400 кВт / В. М. Бойков, С. В. Старцев, А. В. Павлов, Е. С. Нестеров // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 5. – С. 125–129.

94. Результаты экспериментальных исследований режимов функционирования рабочего органа щелереза / И. В. Божко, Г. Г. Пархоменко, С. И. Камбулов, Н. В. Бужинский // Таврический вестник аграрной науки. – 2025. – № 1(41). – С. 41–51.

95. Рожков, В. А. Физические и водно-физические свойства почв : учеб.-метод. пособие / В. А. Рожков, А. Г. Бондарев. – Москва : МГУЛ, 2002. – 73 с.

96. Румшанский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента : справочное руководство / Л. З. Румшанский. – Москва, 1971. – 192 с.

97. Сабликов, М. В. Сельскохозяйственные машины. Основы теории и технологического расчета. Ч. 2. / М. В. Сабликов. – Москва : Колос, 1968. – 296 с.

98. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет / Б. Г. Турбин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, 1967. – 584 с.

99. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 325 с.

100. Сохт, К. А. Машинные технологии возделывания зерновых культур : монография / К. А. Сохт. – Краснодар, 2001. – 271 с.

101. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 416 с.

102. СТО АИСТ 4.6–2018. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины почвообрабатывающие. Показатели назначения и надежности. Общие требования. – Введ. 15.09.2018. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. – 34 с.
103. Тарасенко, Б. И. Повышение плодородия почв Кубани : монография / Б. И. Тарасенко. – Краснодар : КубГАУ, 2014. – 130 с.
104. Тарасенко, Б. Ф. Инновационные разработки для АПК / Б. Ф. Тарасенко, В. В. Цыбулевский. – Краснодар : ИП Кабанов В. Б., 2024. – 89 с.
105. Тарасенко, Б. Ф. Плуг-рыхлитель / Б. Ф. Тарасенко, А. Ю. Николенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 201. – С. 239–253.
106. Тарасенко, Б. Ф. Плуг-щелеватель-рыхлитель / Б. Ф. Тарасенко, А. Ю. Николенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2024. – № 203. – С. 54–67.
107. Тарасенко, Б. Ф. Разработка инновационного средства механизации процесса предпосевной обработки почвы при производстве зерновых культур / Б. Ф. Тарасенко, В. А. Дробот, А. Ю. Николенко. – Краснодар : ИП Кабанов В. Б., 2024. – 102 с.
108. Тарасенко, Б. Ф. Устройство для предпосевной обработки рисовых чеков / Б. Ф. Тарасенко, А. Ю. Николенко, С. А. Войнаш // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики : материалы XVIII Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение», посвященной 95-летию со дня образования Вятского ГАТУ, Вятский ГАТУ, 03 февраля 2025 года. – Киров, 2025. – С. 203–208.
109. Тарасенко, Б. Ф. Формирование ресурсосберегающих комплексов агрегатов для обработки почвы на основе имитационного моделирования в условиях степной зоны Северного Кавказа : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Тарасенко Борис Фёдорович. – Краснодар, 2015. – 22 с.
110. Тарасенко, Б. Ф. Эколого-мелиоративные методы подготовки почвы : монография / Б. Ф. Тарасенко, В. А. Дробот. – Краснодар : КубГАУ, 2021. – 91 с.

111. Труфанов, В. В. Глубокое чизелевание почвы / В. В. Труфанов. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 140 с.
112. Халанский, В. М. Сельскохозяйственные машины / В. М. Халанский, И. В. Горбачев. – Москва : Колосс, 2003. – 623 с.
113. Халилов, Ш. М. Комбинированные почвообрабатывающие машины и результативность их применения / Ш. М. Халилов, М. Б. Халилов, А. Ф. Жук // Известия Дагестанского ГАУ. – 2019. – № 2(2). – С. 87–92.
114. Хмура, А. Н. Совершенствование конструкции рабочего органа плоско-реза-глубокорыхлителя: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Хмура Александр Николаевич. – Оренбург, 2012. – 147 с.
115. Энергосберегающая технология подготовки тяжелых почв Кубани к посеву и агрегат для ее реализации : монография / Е. И. Трубилин [и др.]. – Краснодар : КубГАУ, 2004. – 219 с.
116. Эффективность использования поворотных плугов для гладкой вспашки почвы / А. Н. Зазуля, А. В. Балашов, В. П. Белогорский [и др.] // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1. – С. 48–52.
117. Improving the working body for primary soil cultivation / В. Tarasenko, А. Nikolenko, V. Drobot [et al.] // E3S Web of Conferences : VI International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2025), Navoi, Uzbekistan, 02–04 апреля 2025 года. – Les Ulis, 2025. – P. 05016.
118. LEMKEN GmbH & Co. KG : сайт. – URL : <https://lemken.com/en/soil-cultivation/ploughing> (дата обращения: 15.09.2025).
119. Sharma, P. Crop production technologies : Tillage effects on soil health and crop productivity: a review / P. Sharma, V. Abrol. – InTech, 2012. – P. 245–262.
120. Ucgul, M. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling / M. Ucgul, J. M. Fielke, C. Saunders // Information Processing in Agriculture. – 2015. – № 2. – P. 130–141.

121. Universal Tillage Implement / B. Tarasenko, A. Nikolenko, V. Drobot // *Acta Technologica Agriculturae*. – 2025. – Vol. 28, №. 1. – P. 26–31.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Определение геометрических показателей многофункционального средства

Корпус многофункционального средства условимся располагать в правой прямоугольной системе координат, оси которой направлены [23, 24]:

- ox – по направлению движения рабочего органа;
- oy – направлена горизонтально к поверхности почвы;
- oz – вертикально вверх.

Направление в пространстве текущей касательной плоскости к поверхности (плоскость ABC на рисунке п.1.1) определим двумя углами:

– $\varepsilon = \angle ODC$ – угол заточки лезвия (двухгранный угол между касательной плоскостью и плоскостью дна борозды $хоу$), град;

– $\gamma = \angle OAB$ – угол раствора лапы (угол между следом касательной плоскости на плоскость $хоу$ и направлением движения корпуса (осью $ох$)), град.

Начальные значения ε и γ этих углов определяют направлением в пространстве плоскости лапы.

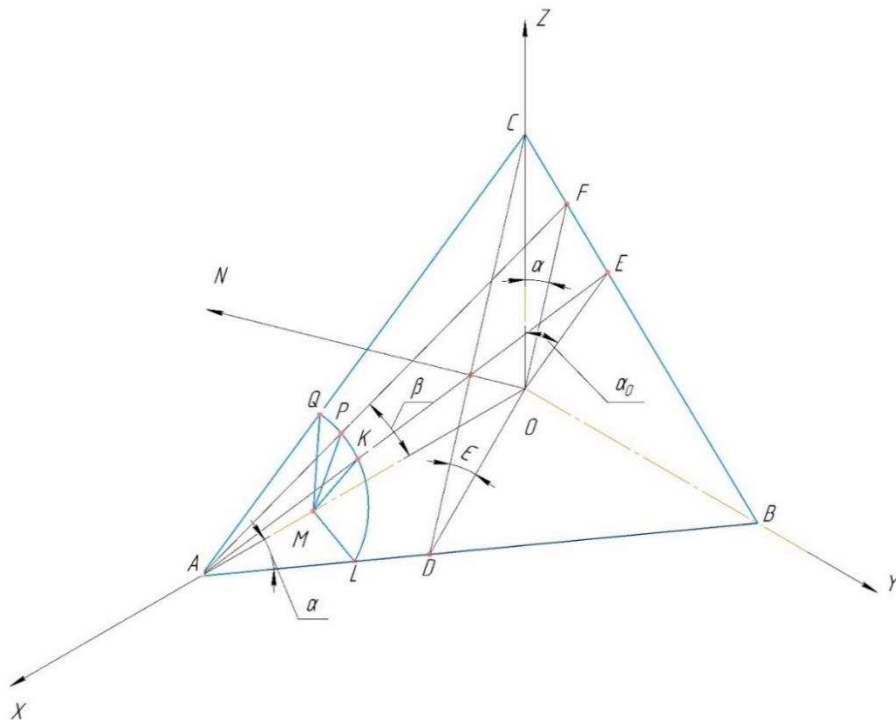


Рисунок п.1.1 – Трехгранный клин

Направлением в пространстве текущей касательной прямой AF к относительной траектории частицы пласта будем определять двумя углами:

– $\alpha = \angle COF$ – угол между осью oz и проекцией на плоскость uoz касательной прямой AF и осью ox , град.

– $\beta = \angle OAF$ – угол между касательной AF и осью ox , град.

Начальные значения α и β этих углов определяют направлением в пространстве касательной к относительной траектории в начальной точке (на лапе). После разгибания развертывающейся поверхности в плоскость относительная траектория станет плоской кривой. Ее касательная составит с лезвием лапы в развертке некоторый угол η .

Определение проекции силы Q на оси координат

Направление силы Q в пространстве определим двумя углами (рисунок п.1.2):

$\varepsilon' = \angle MQ$ – угол между осью OZ и силой Q , град;

$\gamma' = \angle BMQ$ – двугранный угол между координатной плоскостью YOZ и плоскостью, проходящей через ось OZ и силу Q , град.

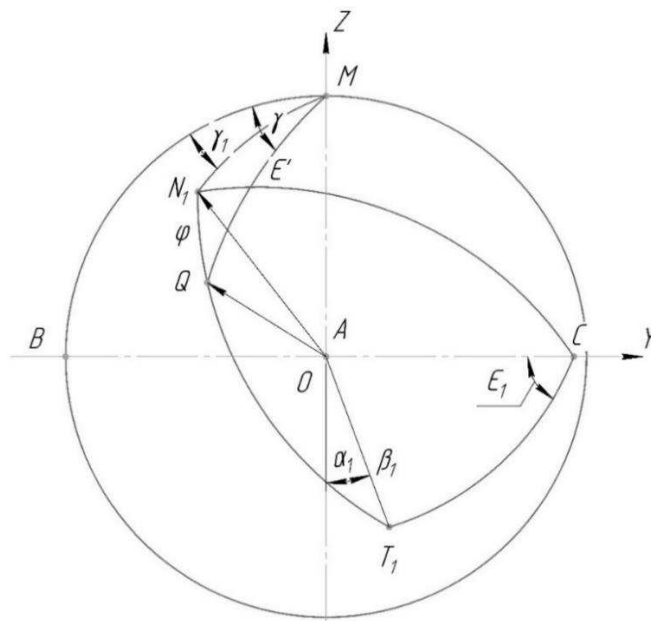


Рисунок п.1.2 – Сферический треугольник Q

Вертикальная плоскость, проходящая через нормаль к поверхности ON_1 (изображаемая дугой $\overline{MN_1}$) перпендикулярна к прямой OC – лезвию лапы; следовательно, она перпендикулярна и к плоскости OCN_1 (дуге $\overline{CN_1}$), проходящей через нормаль к поверхности и лезвия лапы; $\angle MN_1C = 90^\circ$.

Сила Q располагается в плоскости T_1ON_1 (OT_1 – касательная к относительной траектории), отклоняясь от нормали ON_1 на угол трения $\varphi = \overline{N_1Q}$. В треугольнике MN_1Q имеем:

$$\begin{aligned} \overline{MN_1} &= \angle ACT_1 = \varepsilon_1; \angle BMN_1 \angle \overline{AC} = \gamma_1; \overline{MQ} = \varepsilon'; \angle N_1MQ = \gamma' - \gamma_1; \\ \angle MN_1Q &= \angle MN_1C + \angle CN_1Q = 90^\circ + \eta_1. \end{aligned} \quad (\text{п.1.1})$$

Усилия, возникающие под действием собственного веса пласта

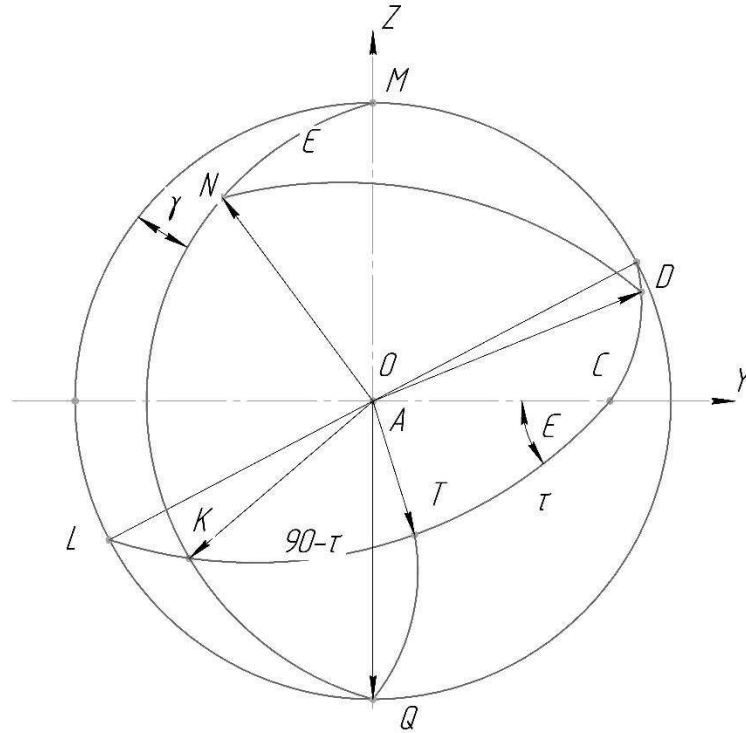
Выделим из пласта двумя бесконечно близкими плоскостями, перпендикулярными к оси (линии, соединяющие центры тяжести сечений) пласта, элемент длиной dS ; его вес будет

$$dQ = aby dS. \quad (\text{п.1.2})$$

Спроецируем силу dQ на три направления: нормали к поверхности, касательной траектории; для этого необходимо определить косинусы углов, составленные силой веса dQ с указанными направлениями.

На рисунке п.1.3 показано:

- ON – нормаль к поверхности;
- OT – касательная к траектории;
- OD – геодезическая нормаль траектории;
- OQ – направлении силы веса;
- $DCTK$ – касательная плоскость к поверхности;
- $\overline{TC} = \tau$ – угол между касательной к траектории OT и горизонтальной прямой OC , лежащей в касательной плоскости к поверхности.

Рисунок п.1.3 – Сферический треугольник dQ

Спроектируем силу веса сначала на касательную плоскость к поверхности (на прямую OK , лежащую в касательной плоскости и в вертикальной плоскости, проходящей через нормаль к поверхности ON); получим:

$$dQ' = dQ \cdot \cos(\widehat{KQ}) = dQ \sin \varepsilon. \quad (\text{п.1.3})$$

Далее получаем проекции силы dQ на направления ON , OT и OP :

$$\begin{cases} dQ_n = dQ \cos(\widehat{NQ}) = -ab\gamma \cos \varepsilon dS; \\ dQ_t = dQ' \cos(\widehat{KT}) = ab\gamma \sin \varepsilon \sin \tau dS; \\ dQ_p = dQ' \sin(\widehat{KT}) = ab\gamma \sin \varepsilon \sin \tau dS. \end{cases} \quad (\text{п.1.4})$$

Усилие dQ_n , прижимающее пласт к отвалу, обуславливает возникновения соответствующей силы трения; сила dQ_p стремится отклонить траекторию частицы от геодезической линии (эта сила была учтена при составлении дифференциального уравнения относительной траектории). Усилие dQ_t создает напряжения сжатия пласта в осевом направлении.

Формулу для силы dQ_t можно упростить, проектируя силу dQ непосредственно на направление касательной. Угол между направлениями силы dQ и касательной OT .

Из сферического треугольника KQT , в котором

$$\overline{KT} = 90^\circ - \tau; \overline{KQ} = 90^\circ - \varepsilon; \angle QKT = 90^\circ,$$

найдем

$$\cos(\widehat{T, Q}) = \sin\varepsilon \sin\tau. \quad (\text{п.1.5})$$

Следовательно

$$dQ_t = ab\gamma \cos(\widehat{T, Q}) dS = ab\gamma dh. \quad (\text{п.1.6})$$

Сжимающее усилие от веса в любом сечении пласта определяется по формуле:

$$T_Q = ab\gamma h_T, \quad (\text{п.1.7})$$

где h_T – разности уровней расположения центров тяжести наивысшего и рассматриваемого сечения пласта, м.

Таким образом, на концевых сечениях выделенного элемента пласта действуют сжимающие усилия T_Q и $T'_Q = T_Q + dT_Q$; эти силы направлены по касательной к осевой линии пласта в советующих точках.

Так как dS является величиной бесконечно малой, то силы T_Q и T'_Q лежат в соприкасающейся плоскости относительной траектории (изогнутой оси планеты) и, складываясь, дают равнодействующую dN . Эта сила лежит в той же (соприкасающейся) плоскости и направлена по главной нормали траектории, так как силы T_Q и T'_Q в пределе можно считать равными.

Модуль силы dN , равен:

$$dN = TcdS = Td\omega, \quad (\text{п.1.8})$$

где c – полная кривизна траектории; $d\omega$ – элементарный угол между касательными к траектории движения пласта по отвалу.

Сила $\overline{dN} = \overline{T_Q} + \overline{T'_Q}$ может быть разложена по двум взаимно перпендикулярным направлениям: нормали к поверхности и нормали, лежащей в касательной плоскости к поверхности. Эти составляющих равны:

$$\begin{cases} dN_n = T_Q d\theta = T_Q c_n dS \\ dN_p = T_Q d\eta = T_Q c_T dS \end{cases} \quad (\text{п.1.9})$$

где dN_n – элементарная составляющая силы, направленная по нормали к поверхности прижимающая пласт к отвалу, создает дополнительную силу трения; dN_p – элементарная составляющая силы, лежащая в касательной плоскости к поверхности; $d\theta$ – элементарный угол охвата пласта отвалом.

Движение частиц после отвала. Если направление касательной к относительной траектории определено углами α и β_2 то можно записать [32]:

$$v_2 = v_e \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi^2 \cos\beta_2}. \quad (\text{п.1.10})$$

УТВЕРЖДАЮ
 Директор «Рисоводческого
 племенного завода
 «Красноармейский»
 имени А.И.Майстренко»
 Филиал ФГБНУ «ФНС риса»

Кизинёк С.В.

«20» Август 2024 г.

АКТ

Комиссия в составе председателя главного инженера РПЗ «Красноармейский» Гаврилова В.Н., а также членов комиссии представителей ФГБОУ ВО «Кубанского государственного аграрного университета им. И.Т. Трубилина» профессора кафедры ремонта машин и материаловедения Тарасенко Б.Ф. и аспиранта Николенко А.Ю., составили настоящий акт о внедрении в производство агрегата плуг-рыхлитель. Агрегат включает, раму с закрепленными на ней в шахматном порядке рабочими органами - пластинчатыми стойками, в нижней части которых закреплены под углом стрельчатые лапы в виде треугольной пластины с заточенными сторонами, стойками оснащёнными съёмными устанавливаемыми неподвижно опорными кольцами со скосом и съёмным поворотным кольцом, к которым приварены левосторонний и правосторонний отвалы, установленные под углом друг к другу и рычаг поворота, связанный с помощью реечного механизма с гидроцилиндром. Агрегат обеспечивает повышение эксплуатационной надежности, снижение затрат времени на необходимые согласно агротребованиям развороты и регулировки, повышения качества обработки почвы и расширения функциональных возможностей.

За счет снижения эксплуатационных затрат приведенный экономический эффект от применения агрегата плуг-рыхлитель составил 12250 руб/га.

Председатель комиссии:

Главный инженер РПЗ «Красноармейский»

В.Н. Гаврилов

Члены комиссии:

Профессор КубГАУ

Б.Ф. Тарасенко

Аспирант КубГАУ

А.Ю. Николенко



Первый проректор
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ
профессор
Резниченко С.М.
2025 г.

АКТ


об использовании в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» на факультете механизации результатов научно-исследовательской работы аспиранта 3-го года очной формы обучения Николенко Александра Юрьевича

Комиссия в составе: председателя – декана факультета механизации, доцента А.А. Титученко, членов комиссии – заведующего кафедрой «Тракторы, автомобили и техническая механика» В.С. Курасова и профессора кафедры «Тракторы, автомобили и техническая механика» Б.Ф. Тарасенко рассмотрела результаты научно-исследовательской работы аспиранта кафедры «Тракторы, автомобили и техническая механика» Николенко Александра Юрьевича по совершенствованию технологии и технических средств основной обработки почвы при возделывание зерновых и их использование в учебном процессе на факультете механизации.

Комиссия установила, что результаты научно-исследовательской работы Николенко Александра Юрьевича используются в учебном процессе на кафедре «Тракторы, автомобили и техническая механика» при написании выпускных квалификационных работ обучающихся по направлению подготовки 35.04.06 «Агроинженерия», направленность «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»

Председатель комиссии  А.А. Титученко

Члены комиссии  В.С. Курасов

 Б.Ф. Тарасенко

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 225628

ПЛУГ-РЫХЛИТЕЛЬ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)*

Авторы: *Тарасенко Борис Федорович (RU), Николенко Александр Юрьевич (RU), Орленко Сергей Юрьевич (RU), Кизинек Сергей Владимирович (RU), Гаврилов Владимир Николаевич (RU), Дробот Виктор Александрович (RU)*

Заявка № 2024103804

Приоритет полезной модели 14 февраля 2024 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 26 апреля 2024 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 14 февраля 2034 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ (19) **RU** (11) **229 905**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
A01B 49/02 (2006.01)
A01B 35/16 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
A01B 49/02 (2024.08); A01B 35/16 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024118999, 04.07.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 04.07.2024

Дата регистрации: 01.11.2024

Приоритеты:
(22) Дата подачи заявки: 04.07.2024

(45) Опубликовано: 01.11.2024 Бюл. № 31

Адрес для переписки:
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, отдел организации и сопровождения научной деятельности

(72) Автор(ы):
Тарасенко Борис Федорович (RU),
Гаврилов Владимир Николаевич (RU),
Дробот Виктор Александрович (RU),
Николенко Александр Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубникова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 225628 U1, 26.04.2024, RU 75822 U1, 27.08.2008, UZ 741 U, 31.08.2012, KZ 31005 A4, 15.04.2016.

(54) Универсальное почвообрабатывающее орудие

(57) Реферат:
Полезная модель относится к области сельскохозяйственного машиностроения, в частности к средствам для основной обработки почвы с движением агрегата вращением способом при отвалной и безотвалной технологии. Для расширения функциональных возможностей, повышения качества обработки почвы, водонепроницаемости и азирива, снижения фактора влияния на прямолинейность движения трактора при вспашке в раме 1 орудия с двух боков шарнирно прикреплены два плоских щеточера 16 и 17, связанные кинематически с поперечинами 14 и 15 режущего механизма 12.

RU 229905 U1

RU 229905 U1

RU 229905 U1

RU 221238 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ (19) **RU** (11) **221 238**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
A01B 49/06 (2006.01)
A01B 35/14 (2006.01)
A01B 35/10 (2006.01)
A01B 35/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
A01B 49/06 (2023.08); A01B 35/14 (2023.08); A01B 35/10 (2023.08); A01B 35/02 (2023.08)

(21)(22) Заявка: 2023111800, 04.05.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 04.05.2023

Дата регистрации: 26.10.2023

Приоритеты:
(22) Дата подачи заявки: 04.05.2023

(45) Опубликовано: 26.10.2023 Бюл. № 30

Адрес для переписки:
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, отдел организации и сопровождения научной деятельности

(72) Автор(ы):
Тарасенко Борис Федорович (RU),
Кизинов Сергей Владимирович (RU),
Гаврилов Владимир Николаевич (RU),
Орловский Сергей Юрьевич (RU),
Дробот Виктор Александрович (RU),
Николенко Александр Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубникова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: KZ 17303 B, 17.05.2010, RU 2327322 C1, 27.06.2008, RU 2581881 C1, 20.04.2016, CN 106342428 A, 25.01.2017.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ И ПРЕДПОСЕВНОГО ВНЕСЕНИЯ ЖИДКИХ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ, КАРБАМИДНО-АММИАЧНОЙ СЕЛЕТРЫ

(57) Реферат:
Для снижения фактора экологического воздействия и повышения качества обработки почвы и внесения ЖКУ и КАС система дозирования выполнена в виде ротаметра, конический элемент которого связан со штоком, задающим необходимую дозу, а система подачи рабочей жидкости в почву выполнена в виде прикреплённой сзади к стойкам 2-го ряда перед сдвижным кольчатым катком 4-х метровой трубы квадратного сечения, оснащенной в нижней части перфорацией для слива раствора, эластичным уплотнителем и шарнирно установленной скатной пластиной, управляемой с помощью линейного актуатора и рычага.

RU 221238 U1

Степ. 1

RU 221238 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ (19) **RU** (11) **236 428**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
A01B 34/2 (2006.01)
A01B 17/00 (2006.01)
A01B 13/14 (2006.01)
A01B 13/16 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
A01B 34/64 (2025.01); A01B 17/00 (2025.01); A01B 13/14 (2025.01); A01B 13/16 (2025.01)

(21)(22) Заявка: 2025101997, 30.01.2025

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 30.01.2025

Дата регистрации: 07.08.2025

Приоритеты:
(22) Дата подачи заявки: 30.01.2025

(45) Опубликовано: 07.08.2025 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, 13, ОГБУ ВО КГАУ, Кошарев Андрей Георгиевич

(72) Автор(ы):
Тарасенко Борис Федорович (RU),
Гаврилов Владимир Николаевич (RU),
Николенко Александр Юрьевич (RU),
Дробот Виктор Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубникова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: GB 928424 A, 12.06.1963, GB 660858 A, 14.11.1951, JP 2006217863 A, 24.08.2006, RU 2215385 C2, 10.11.2003, RU 230180 C1, 10.06.2007, SU 957776 A1, 15.09.1982.

(54) ОБОРОТНЫЙ ПЛУГ С ДРЕНЕРОМ

(57) Реферат:
Полезная модель относится к сельскому хозяйству. Обратный плуг с дренером содержит балку сцепления с трактором, устройство реверсивного поворота оборотной рамы, оборотную раму (1) с осью, шарнирно соединенной с балкой сцепления с возможностью относительного поворота в вертикальной плоскости, левые и правые плужные корпуса (2 и 3), закрепленные с обеих сторон оборотной рамы (1) и опорные колеса (4). Сзади крайних плужных корпусов (2 и 3) на их стойках (5) смонтированы кронштейны (6), на которых шарнирно установлены дополнительные стойки (8), оснащенные заточкой (9) на боковой поверхности, дренерами (10) в виде цилиндров с коническими наконечниками и пружинными фиксаторами (7) для установления дрены (10) в рабочее и транспортное положение. Обеспечивается расширение функциональной возможности за счет обеспечения системы реверсирования влаги, 3 ил.

RU 236428 U1

RU 236428 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ (19) **RU** (11) **2 824 826**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
A01B 49/06 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
A01B 49/06 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2024106211, 05.03.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 05.03.2024

Дата регистрации: 14.08.2024

Приоритеты:
(22) Дата подачи заявки: 05.03.2024

(45) Опубликовано: 14.08.2024 Бюл. № 23

Адрес для переписки:
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, отдел организации и мониторинга научной деятельности

(72) Автор(ы):
Тарасенко Борис Федорович (RU),
Богатырев Николай Иванович (RU),
Гаврилов Владимир Николаевич (RU),
Николенко Александр Юрьевич (RU),
Бойко Алексей Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т.Трубникова" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 118825 U1, 10.08.2012, RU 2687201 C1, 07.05.2019, RU 2685398 C1, 17.04.2019, RU 2796842 C1, 29.05.2023, EP 3453238 A1, 13.03.2019.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ РИСОВЫХ ЧЕКОВ

(57) Реферат:
Изобретение относится к области сельскохозяйственного машиностроения. Устройство для предпосевной обработки рисовых чеков включает глубоководный, рабочие стойки с ножами, с боковыми лезвиями-кромками и зубьями, покрытыми карбидом вольфрама, гидравлический сдвижной кольчатый задний каток. На раме устройства смонтирована бочка, сообщенная с трубой с насосом, оснащенной системой регулировки давления, система дозирования и подачи рабочей жидкости в почву, а также система вывески. Выход насоса сообщен патрубком с системой дозирования, выполненной в виде ротаметра, конический элемент которого связан со штоком, задающим необходимую дозу. От системы дозирования отведен патрубок, соединенный с системой подачи рабочей жидкости в почву, выполненной в виде размещенной сзади перед сдвижным кольчатым катком 4-х метровой трубы квадратного сечения, оснащенной в нижней части перфорацией для слива раствора, эластичным уплотнителем и шарнирно установленной скатной пластиной, управляемой с помощью линейного актуатора. Труба в ее центральной части шарнирно установлена на жестко зафиксированном конце патрубка с сальником, оснащена актуатором, который смонтирован на ней спереди и вертикально. Также труба оснащена П-образным кронштейном, с помощью которого прикреплена к фланцу, смонтированному на червячном мотор-редукторе, установленном на угловом кронштейне, приваренном в центральной части бруса рамы второго ряда стоек. Электродвигатель мотор-редуктора подключен к блоку электроснабжения энергетического средства через систему управления, установленную на брус рамы второго ряда стоек, включающую резисторы, конденсаторы, контакты гироскопа лево верх и право верх.

RU 2824826 C1

Степ. 1

RU 2824826 C1



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский федеральный научный центр агроботехнологий Российской академии наук

Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СФНЦА РАН



**СЕРТИФИКАТ
CERTIFICATE**

НАСТОЯЩИМ УДОСТОВЕРЯЕТСЯ, ЧТО
THIS IS TO CERTIFY THAT

Николенко Александр Юрьевич

принял(а) участие в работе
Международной научно-технической конференции,
посвященной 65-летию образования СИБИМЭ СФНЦА РАН

«Роль цифровизации в научно-техническом
обеспечении АПК Сибири»,

took part in the work
International Scientific and Technical Conference dedicated to the 65th anniversary of the SibIME SFSCA RAS

"The role of digitalization in the scientific and technical support of the agro-industrial complex of Siberia"

Выступил(а) с докладом:

ПЛУГ-ЩЕЛКОВАТЕЛЬ-РЫХЛИТЕЛЬ

Директор СФНЦА РАН,
чл.-корр. РАН, профессор РАН

К.С. Головаст



Краснообск, 3-4 октября 2024 г.





Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ

СЕРТИФИКАТ

участника

XVIII Международной
научно-практической конференции
«Наука-Технология-Ресурсосбережение»,
посвященной 95-летию Вятского ГАТУ

выдан

Николенко Александру Юрьевичу

ассистенту Кубанского ГАУ им. Трубилина

Председатель оргкомитета
и.о. директора института инженерии
и агротехнологии, канд. с.-х. наук



Софронов Е.А.

Киров, 03 февраля 2025 г.



ДИПЛОМ

Дипломанта

III этапа Всероссийского конкурса
на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов
и молодых ученых аграрных образовательных и научных
организаций России
в номинации «Машины и оборудование для АПК»

награждается

**Николенко Александр
Юрьевич**

(научный рук. – д.т.н., профессор Шарасенко Б.Ф.)
обучающийся ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ



Handwritten signature

Уфа, 15-16 мая 2025 г.



Листинг программы

Определение оптимальных параметров рабочих органов
и режима работы многофункционального средства

ORIGIN := 1

n := 14 -число проведенных опытов

Действительные значения переменных

Отклик

$$\begin{array}{c}
 X1 := \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 X2 := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 X3 := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 y := \begin{bmatrix} 9600 \\ 10300 \\ 9300 \\ 11000 \\ 9800 \\ 11000 \\ 9900 \\ 12100 \\ 7150 \\ 8600 \\ 8550 \\ 9000 \\ 7650 \\ 8300 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

$$zy := \sum y$$

$$zX1y := X1 \cdot y$$

$$zX2y := X2 \cdot y$$

$$zX3y := X3 \cdot y$$

$$zy = 1.323 \cdot 10^5$$

$$zX1y = -7.25 \cdot 10^3$$

$$zX2y = -2.05 \cdot 10^3$$

$$v_{10} := zy$$

$$v_9 := zX1y$$

$$v_8 := zX2y$$

$$v_7 := zX3y$$

$$zX1X2y := \begin{array}{l}
 s \leftarrow 0 \\
 j \leftarrow 1 \\
 \text{while } n \geq j \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 s \leftarrow s + X1_j \cdot X2_j \cdot y_j \\
 j \leftarrow j + 1
 \end{array} \right. \\
 s
 \end{array}$$

$$zX1X3y := \begin{array}{l}
 s \leftarrow 0 \\
 j \leftarrow 1 \\
 \text{while } n \geq j \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 s \leftarrow s + X1_j \cdot X3_j \cdot y_j \\
 j \leftarrow j + 1
 \end{array} \right. \\
 s
 \end{array}$$

$$zX1X2y = 2 \cdot 10^3$$

$$zX1X3y = 1 \cdot 10^3$$

$$v_6 := zX1X2y$$

$$v_5 := zX1X3y$$

$$zX2X3y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X3_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX2X3y = 800$$

$$v_4 := zX2X3y$$

$$zX1X1y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX1X1y = 9.875 \cdot 10^4$$

$$v_3 := zX1X1y$$

$$zX2X2y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX2X2y = 1.006 \cdot 10^5$$

$$v_2 := zX2X2y$$

$$zX3X3y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X3_j \cdot X3_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX3X3y = 98950$$

$$v_1 := zX3X3y$$

$$zX1 := \sum X1$$

$$zX2 := \sum X2$$

$$zX3 := \sum X3$$

$$zX1 = 0$$

$$zX2 = 0$$

$$zX3 = 0$$

$$zX1X2 := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X2_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX1X2 = 0$$

$$M_{10,6} := zX1X2$$

$$zX1X3 := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX1X3 = 0$$

$$M_{10,5} := zX1X3$$

$$zX2X3 := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX1X1 := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zX2X3 = 0 \quad M_{10,4} := zX2X3 \quad zX1X1 = 10 \quad M_{10,3} := zX1X1$$

$$zX2X2 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX3X3 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX2X2 = 10 \quad M_{10,2} := zX2X2 \quad zX3X3 = 10 \quad M_{10,1} := zX3X3$$

$$zX1X1X3 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX1X1X2 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot X2_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX1X1X3 = 0 \quad M_{9,5} := zX1X1X3 \quad zX1X1X2 = 0 \quad M_{9,6} := zX1X1X2$$

$$zX1X2X3 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X3_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX1X1X1 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX1X2X3 = 0 \quad M_{9,4} := zX1X2X3 \quad zX1X1X1 = 0 \quad M_{9,3} := zX1X1X1$$

$$zX2X2X1 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX1X3X3 := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$zX2X2X1 = 0 \quad M_{9,2} := zX2X2X1 \quad zX1X3X3 = 0 \quad M_{9,1} := zX1X3X3$$

$$zX2X2X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X2X3 = 0$$

$$M_{8,4} := zX2X2X3$$

$$zX2X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X3X3 = 0$$

$$M_{8,1} := zX2X3X3$$

$$zX2X2X2 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X2_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X2X2 = 0$$

$$M_{8,2} := zX2X2X2$$

$$zX3X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X3_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX3X3X3 = 0$$

$$M_{7,1} := zX3X3X3$$

$$zX2X2X1X1 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X1_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X2X1X1 = 8$$

$$M_{6,6} := zX2X2X1X1$$

$$zX3X3X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X3_j \cdot X3_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX3X3X3X3 = 10$$

$$M_{1,1} := zX3X3X3X3$$

$$zX2X2X2X2 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X2_j \cdot X2_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X2X2X2 = 10$$

$$M_{2,2} := zX2X2X2X2$$

$$zX1X1X1X1 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot X1_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X1X1X1 = 10$$

$$M_{3,3} := zX1X1X1X1$$

$$zX2X2X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X1X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X2X3X3 = 8$$

$$M_{1,2} := zX2X2X3X3$$

$$zX1X1X3X3 = 8$$

$$M_{1,3} := zX1X1X3X3$$

$$zX2X3X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X3_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X3X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X3_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X3X3X3 = 0$$

$$M_{1,4} := zX2X3X3X3$$

$$zX1X3X3X3 = 0$$

$$M_{1,5} := zX1X3X3X3$$

$$zX1X2X3X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X2_j \cdot X3_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX2X2X2X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X2_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X2X3X3 = 0$$

$$M_{1,6} := zX1X2X3X3$$

$$zX2X2X2X3 = 0$$

$$M_{2,4} := zX2X2X2X3$$

$$zX1X2X2X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X2_j \cdot X2_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X2X2X2 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X2_j \cdot X2_j \cdot X2_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X2X2X3 = 0$$

$$M_{2,5} := zX1X2X2X3$$

$$zX1X2X2X2 = 0$$

$$M_{2,6} := zX1X2X2X2$$

$$zX1X1X2X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X2_j \cdot X3_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X1X1X3 := \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot X1_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array}$$

$$zX1X1X2X3 = 0$$

$$M_{3,4} := zX1X1X2X3$$

$$zX1X1X1X3 = 0$$

$$M_{3,5} := zX1X1X1X3$$

$zX1X1X1X2 := \left \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X2_j \cdot X1_j \cdot X1_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$	$zX1X1X2X3 := \left \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 1 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left \begin{array}{l} s \leftarrow s + X1_j \cdot X1_j \cdot X2_j \cdot X3_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$
--	--

 $zX1X1X1X2 = 0$
 $M_{3,6} := zX1X1X1X2$
 $zX1X1X2X3 = 0$
 $M_{6,5} := zX1X1X2X3$

$M_{10,10} := n$	$M_{10,9} := zX1$	$M_{10,8} := zX2$	$M_{10,7} := zX3$	$M_{3,9} := M_{9,3}$
$M_{9,10} := M_{10,9}$	$M_{8,10} := M_{10,8}$	$M_{7,10} := M_{10,7}$	$M_{6,10} := M_{10,6}$	$M_{5,10} := M_{10,5}$
$M_{4,10} := M_{10,4}$	$M_{3,10} := M_{10,3}$	$M_{2,10} := M_{10,2}$	$M_{1,10} := M_{10,1}$	$M_{9,8} := M_{10,6}$
$M_{8,9} := M_{10,6}$	$M_{9,7} := M_{10,5}$	$M_{7,9} := M_{10,5}$	$M_{8,7} := M_{10,4}$	$M_{7,8} := M_{10,4}$
$M_{9,9} := M_{10,3}$	$M_{8,8} := M_{10,2}$	$M_{7,7} := M_{10,1}$	$M_{6,9} := M_{9,6}$	$M_{5,9} := M_{9,5}$
$M_{8,5} := M_{9,4}$	$M_{7,6} := M_{9,4}$	$M_{6,7} := M_{9,4}$	$M_{5,8} := M_{9,4}$	$M_{4,9} := M_{9,4}$
$M_{2,9} := M_{9,2}$	$M_{8,6} := M_{9,2}$	$M_{6,8} := M_{9,2}$	$M_{7,3} := M_{5,9}$	$M_{3,7} := M_{5,9}$
$M_{1,9} := M_{9,1}$	$M_{5,7} := M_{9,1}$	$M_{7,5} := M_{9,1}$	$M_{8,3} := M_{9,6}$	$M_{5,6} := M_{6,5}$
$M_{4,8} := M_{8,4}$	$M_{2,7} := M_{8,4}$	$M_{1,8} := M_{8,1}$	$M_{7,4} := M_{8,1}$	$M_{4,7} := M_{8,1}$
$M_{3,2} := M_{6,6}$	$M_{2,3} := M_{6,6}$	$M_{2,8} := M_{8,2}$	$M_{1,7} := M_{7,1}$	$M_{7,2} := M_{8,4}$
$M_{2,1} := M_{1,2}$	$M_{4,4} := M_{1,2}$	$M_{3,1} := M_{1,3}$	$M_{5,5} := M_{1,3}$	$M_{3,8} := M_{6,9}$
$M_{4,1} := M_{1,4}$	$M_{5,1} := M_{1,5}$	$M_{4,2} := M_{2,4}$	$M_{5,4} := M_{1,6}$	$M_{4,5} := M_{1,6}$
$M_{6,1} := M_{1,6}$	$M_{4,6} := M_{2,5}$	$M_{5,2} := M_{2,5}$	$M_{6,2} := M_{2,6}$	$M_{6,4} := M_{4,6}$
$M_{4,3} := M_{3,4}$	$M_{5,3} := M_{3,5}$	$M_{6,3} := M_{3,6}$		

	1
1	98950
2	100550
3	98750
4	800
v = 5	1000
6	2000
7	-3250
8	-2050
9	-7250
10	132250

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	8	8	0	0	0	0	0	0	10
2	8	10	8	0	0	0	0	0	0	10
3	8	8	10	0	0	0	0	0	0	10
4	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
M = 5	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
10	10	10	10	0	0	0	0	0	0	14

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	8	8	0	0	0	0	0	0	10
2	8	10	8	0	0	0	0	0	0	10
3	8	8	10	0	0	0	0	0	0	10
4	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
M = 5	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
10	10	10	10	0	0	0	0	0	0	14

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	8	8	0	0	0	0	0	0	10
2	8	10	8	0	0	0	0	0	0	10
3	8	8	10	0	0	0	0	0	0	10
4	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
10	10	10	10	0	0	0	0	0	0	14

M =

	1
1	850
2	1650
3	750
4	100
5	125
6	250
7	-325
8	-205
9	-725
10	7125

 $x := M^{-1} \cdot v$

x =

D0 := x₁₀ D1 := x₉ D2 := x₈ D3 := x₇ D12 := x₆ D13 := x₅ D23 := x₄ D11 := x₃D22 := x₂ D33 := x₁**Действительные коэффициенты уравнения вида:** **$y = D0 + D1 \cdot X1 + D2 \cdot X2 + D3 \cdot X3 + D12 \cdot X1 \cdot X2 + D13 \cdot X1 \cdot X3 + D23 \cdot X2 \cdot X3 + D11 \cdot X1 \cdot X1 + D22 \cdot X2 \cdot X2 + D33 \cdot X3 \cdot X3$**

D0 = 7125

D1 = -725

D2 = -205

D3 = -325

D12 = 250

D13 = 125

D23 = 100

D11 = 750

D22 = 1650

D33 = 850

j := 1.. n

yp1_j := D0 + D1 · X1_j + D2 · X2_j + D3 · X3_jyp2_j := D12 · X1_j · X2_j + D13 · X1_j · X3_j + D23 · X2_j · X3_jyp3_j := D11 · X1_j · X1_j + D22 · X2_j · X2_j + D33 · X3_j · X3_j

yp := yp1 + yp2 + yp3

dy := y - yp

$$X1 =$$

	1
1	1
2	-1
3	1
4	-1
5	1
6	-1
7	1
8	-1
9	1
10	-1
11	0
12	0
13	0
14	0

$$X2 =$$

	1
1	1
2	1
3	-1
4	-1
5	1
6	1
7	-1
8	-1
9	0
10	0
11	1
12	-1
13	0
14	0

$$X3 =$$

	1
1	1
2	1
3	1
4	1
5	-1
6	-1
7	-1
8	-1
9	0
10	0
11	0
12	0
13	1
14	-1

$$y =$$

	1
1	9600
2	10300
3	9300
4	11000
5	9800
6	11000
7	9900
8	12100
9	7150
10	8600
11	8550
12	9000
13	7650
14	8300

$$y_p =$$

	1
1	9595
2	10295
3	9305
4	11005
5	9795
6	10995
7	9905
8	12105
9	7150
10	8600
11	8570
12	8980
13	7650
14	8300

$$dy =$$

	1
1	5
2	5
3	-5
4	-5
5	5
6	5
7	-5
8	-5
9	$-9.095 \cdot 10^{-13}$
10	$-1.819 \cdot 10^{-12}$
11	-20
12	20
13	$-6.366 \cdot 10^{-12}$
14	$-7.276 \cdot 10^{-12}$

Листинг программы

"Каноническое преобразование уравнения регрессии
работы многофункционального средства"

b0 := 7125 b1 := -725 b2 := -205 b3 := -325
b12 := 250 b13 := 125 b23 := 100
b11 := 750 b22 := 1650 b33 := 850 zp := 1

$$2 \cdot b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_3 = -b_1$$

$$b_{12} \cdot x_1 + 2 \cdot b_{22} \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_3 = -b_2$$

$$b_{13} \cdot x_1 + b_{23} \cdot x_2 + 2 \cdot b_{33} \cdot x_3 = -b_3$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & 2 \cdot b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & 2 \cdot b_{33} \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ -b_3 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 0.4667 \\ 0.0221 \\ 0.1556 \end{bmatrix}$$

$$x_1 := x_0 \quad x_2 := x_1 \quad x_3 := x_2$$

$$X1 := 2 \cdot x_1 + 8 \quad X1 = 8.9334$$

$$X2 := 3 \cdot x_2 + 45 \quad X2 = 45.0662$$

$$X3 := 0.03 \cdot x_3 + 0.21 \quad X3 = 0.2147$$

$$f_1(x_1, x_2, x_3) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f(x_1, x_2, x_3) := f_1(x_1, x_2, x_3) + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad Y_s := f(x_1, x_2, x_3)$$

$$b := \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{b_{23}^2}{(b_{22} - b_{33})^2} + 1}} \right] \quad \pi := 3.141592$$

$$\alpha := \text{asin}(b) \quad \alpha = 0.0622$$

$$B1 := b_{11} \quad B2 := b_{22} \cdot (\cos(\alpha))^2 + b_{33} \cdot (\sin(\alpha))^2 + b_{23} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)$$

$$B3 := b_{22} \cdot \sin(\alpha)^2 + b_{33} \cdot \cos(\alpha)^2 - b_{23} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$J1 := b11 + b22 + b33$$

$$J2 := B1 + B2 + B3$$

$$x1 = 0.4667 \quad x2 = 0.0221 \quad x3 = 0.1556 \quad J1 = 3250 \quad J2 = 3250$$

$$Ys = 6928.2839 \quad B1 = 750 \quad B2 = 1653.1129 \quad B3 = 846.8871 \quad \alpha = 3.5625$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Ys = B1 \cdot X_1^2 + B2 \cdot X_2^2 + B3 \cdot X_3^2 \text{ или}$$

$$\frac{(X_1)^2}{\frac{Y - Ys}{B1}} + \frac{(X_2)^2}{\frac{Y - Ys}{B2}} + \frac{(X_3)^2}{\frac{Y - Ys}{B3}} = 1$$

Принимаем $x3 = 0.1556$ тогда:

$$2 \cdot b11 \cdot x1 + b12 \cdot x2 = -b1 - b13 \cdot x3$$

$$b12 \cdot x1 + 2 \cdot b22 \cdot x2 = -b2 - b23 \cdot x3$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b11 & b12 \\ b12 & 2 \cdot b22 \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b1 - b13 \cdot x3 \\ -b2 - b23 \cdot x3 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 0.4667 \\ 0.0221 \end{bmatrix}$$

$$x1 := x_0 \quad x2 := x_1$$

$$f1(x1, x2) := b0 + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x2 + b3 \cdot x3 + b12 \cdot x1 \cdot x2 + b13 \cdot x1 \cdot x3 + b23 \cdot x2 \cdot x3$$

$$f(x1, x2) := f1(x1, x2) + b11 \cdot x1^2 + b22 \cdot x2^2 + b33 \cdot x3^2 \quad Ys := f(x1, x2)$$

$$b := \begin{cases} \frac{b12}{b11 - b22} & \text{if } b12 = 0 \\ \frac{b11 - b22}{b12} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha := \begin{cases} \frac{\text{atan}(b)}{2} & \text{if } b12 = 0 \\ \frac{45 \cdot \pi}{180} & \text{if } b11 = b22 \\ \frac{\text{atan}\left(\frac{1}{b}\right)}{2} & \text{if } b \neq 0 \end{cases}$$

$$E := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A := \begin{bmatrix} b11 & \frac{b12}{2} \\ \frac{b12}{2} & b22 \end{bmatrix} \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$B^2 - B \cdot (b11 + b22) + \left[b11 \cdot b22 - \left(\frac{b12}{2} \right)^2 \right] = 0$$

$$C := \text{eigenvals}(A) \quad C = \begin{bmatrix} 732.9615 \\ 1667.0385 \end{bmatrix} \quad B11 := C_0 \quad B22 := C_1$$

$$Ys = 6928.2839 \quad B11 = 732.9615 \quad B22 = 1667.0385 \quad \alpha = -7.7621$$

$$x1 = 0.4667 \quad x2 = 0.0221$$

$$J1 := b11 + b22 \quad J2 := B11 + B22 \quad J1 = 2400 \quad J2 = 2400$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Ys = B1 \cdot X_1^2 + B2 \cdot X_2^2 \text{ или}$$

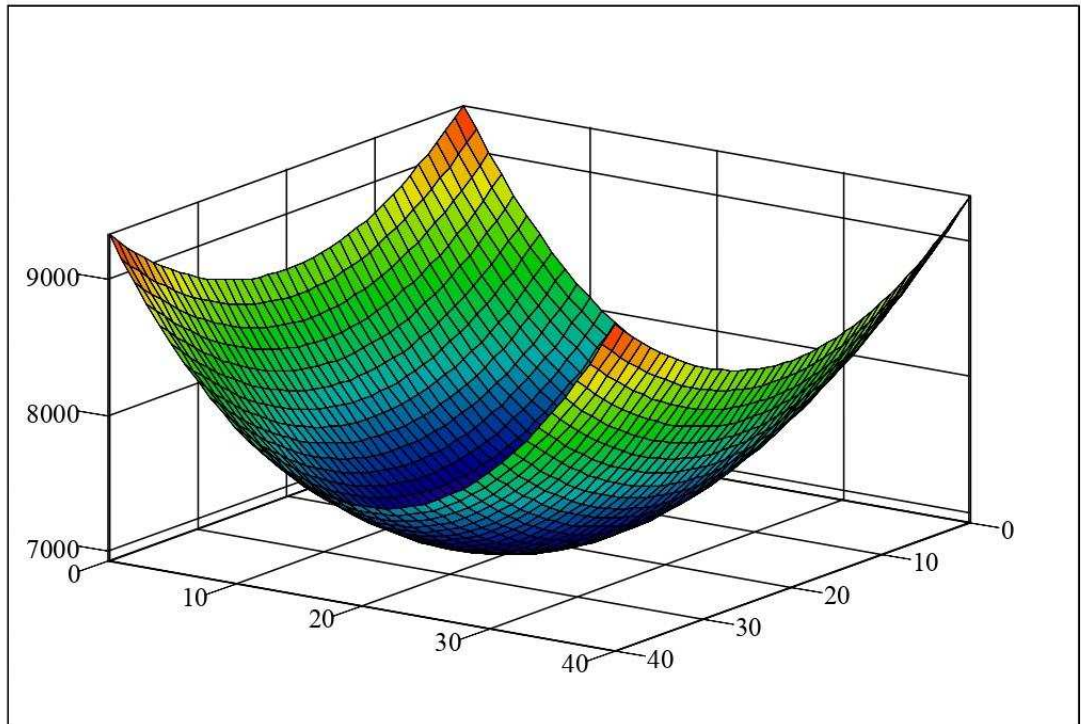
$$\frac{(X_1)^2}{\frac{Y - Ys}{B1}} + \frac{(X_2)^2}{\frac{Y - Ys}{B2}} = 1$$

$$kk := 40 \quad X1 := 0..kk \quad X2 := 0..kk$$

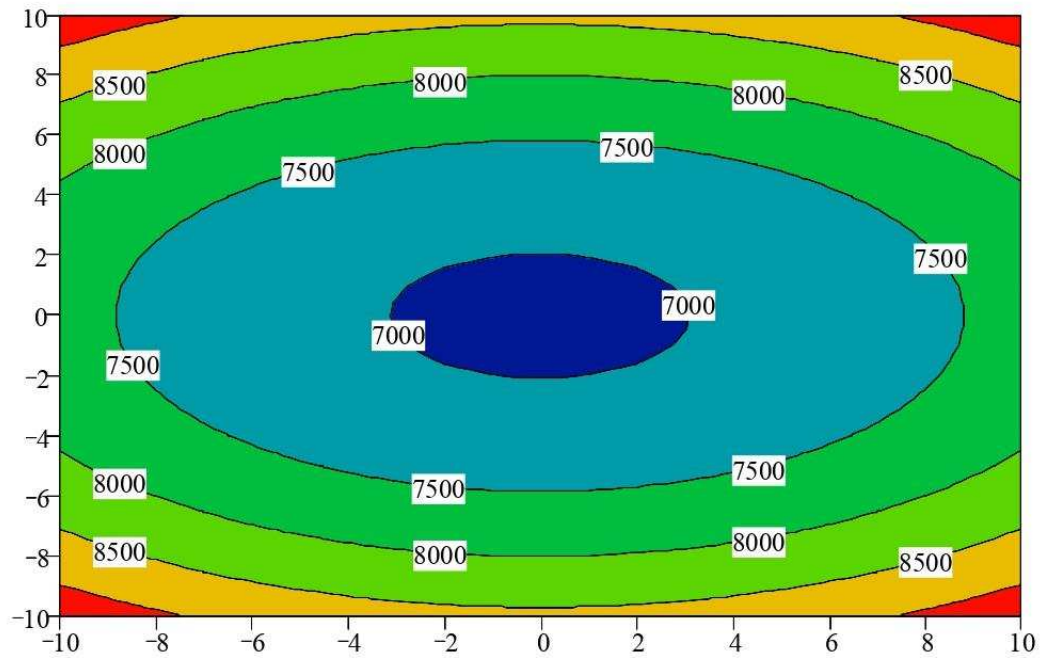
$$X22(X2) := -zp + 2 \cdot \frac{zp}{kk} \cdot X2 \quad X11(X1) := -zp + 2 \cdot \frac{zp}{kk} \cdot X1$$

$$z(X11, X22) := Ys + B11 \cdot X11(X1) \cdot X11(X1) + B22 \cdot X22(X2) \cdot X22(X2)$$

$$K_{X1, X2} := z(X11, X22)$$



K



K

Принимаем $x_2 = 0.0221$ тогда:

$$2 \cdot b_{11} \cdot x_1 + b_{13} \cdot x_3 = -b_1 - b_{12} \cdot x_2$$

$$b_{13} \cdot x_1 + 2 \cdot b_{33} \cdot x_3 = -b_3 - b_{23} \cdot x_2$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_{11} & b_{13} \\ b_{13} & 2 \cdot b_{33} \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b_1 - b_{12} \cdot x_2 \\ -b_3 - b_{23} \cdot x_2 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 0.4667 \\ 0.1556 \end{bmatrix}$$

$$x_1 := x_0 \quad x_3 := x_1$$

$$f_1(x_1, x_3) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f(x_1, x_3) := f_1(x_1, x_3) + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad Y_s := f(x_1, x_3)$$

$$b := \begin{cases} \frac{b_{13}}{b_{11} - b_{33}} & \text{if } b_{13} = 0 \\ \frac{b_{11} - b_{33}}{b_{13}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha := \begin{cases} \frac{\text{atan}(b)}{2} & \text{if } b_{13} = 0 \\ \frac{45 \cdot \pi}{180} & \text{if } b_{11} = b_{33} \\ \frac{\text{atan}\left(\frac{1}{b}\right)}{2} & \text{if } b \neq 0 \end{cases}$$

$$E := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A := \begin{bmatrix} b_{11} & \frac{b_{13}}{2} \\ \frac{b_{13}}{2} & b_{33} \end{bmatrix} \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$B^2 - B \cdot (b_{11} + b_{33}) + \left[b_{11} \cdot b_{33} - \left(\frac{b_{13}}{2} \right)^2 \right] = 0$$

$$C := \text{eigenvals}(A) \quad C = \begin{bmatrix} 719.9609 \\ 880.0391 \end{bmatrix} \quad B_{11} := C_0 \quad B_{33} := C_1$$

$$Y_s = 6928.2839 \quad B_{11} = 719.9609 \quad B_{33} = 880.0391 \quad \alpha = -25.6701$$

$$x1 = 0.4667$$

$$x3 = 0.1556$$

$$J1 := b11 + b33$$

$$J2 := B11 + B33$$

$$J1 = 1600$$

$$J2 = 1600$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Y_s = B1 \cdot X_1^2 + B3 \cdot X_3^2 \text{ или}$$

$$\frac{(X_1)^2}{\frac{Y - Y_s}{B1}} + \frac{(X_3)^2}{\frac{Y - Y_s}{B3}} = 1$$

$$kk := 40$$

$$X1 := 0..kk$$

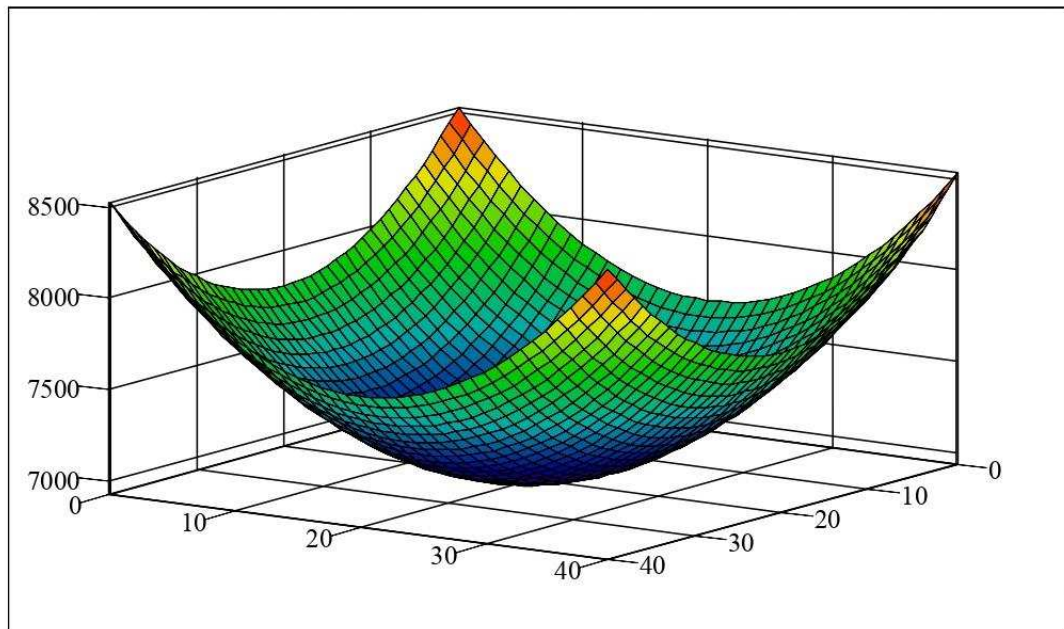
$$X3 := 0..kk$$

$$X11(X1) := -zp + 2 \cdot \frac{zp}{kk} \cdot X1$$

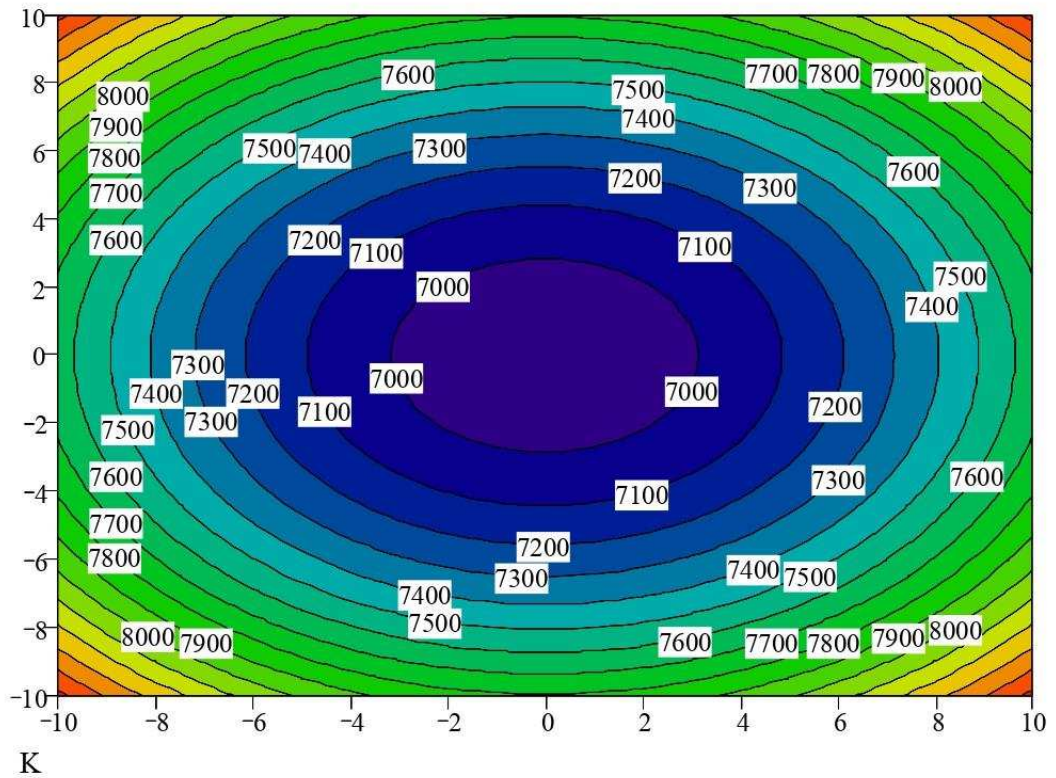
$$X33(X3) := -zp + 2 \cdot \frac{zp}{kk} \cdot X3$$

$$z(X11, X33) := Y_s + B11 \cdot X11(X1) \cdot X11(X1) + B33 \cdot X33(X3) \cdot X33(X3)$$

$$K_{X1, X3} := z(X11, X33)$$



K



Принимаем $x_1 = 0.4667$ тогда:

$$2 \cdot b_{22} \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_3 = -b_2 - b_{12} \cdot x_1$$

$$b_{23} \cdot x_2 + 2 \cdot b_{33} \cdot x_3 = -b_3 - b_{13} \cdot x_1$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_{22} & b_{23} \\ b_{23} & 2 \cdot b_{33} \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b_2 - b_{12} \cdot x_1 \\ -b_3 - b_{13} \cdot x_1 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 0.0221 \\ 0.1556 \end{bmatrix}$$

$$x_2 := x_0$$

$$x_3 := x_1$$

$$f_1(x_2, x_3) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f(x_2, x_3) := f_1(x_2, x_3) + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad Y_s := f(x_2, x_3)$$

$$b := \begin{cases} \frac{b23}{b22 - b33} & \text{if } b23=0 \\ \frac{b22 - b33}{b23} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha := \begin{cases} \frac{\text{atan}(b)}{2} & \text{if } b23=0 \\ \frac{45 \cdot \pi}{180} & \text{if } b22=b33 \\ \frac{\text{atan}\left(\frac{1}{b}\right)}{2} & \text{if } b \neq 0 \end{cases}$$

$$E := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A := \begin{bmatrix} b22 & \frac{b23}{2} \\ \frac{b23}{2} & b33 \end{bmatrix} \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$B^2 - B \cdot (b22 + b33) + \left[b22 \cdot b33 - \left(\frac{b23}{2} \right)^2 \right] = 0$$

$$C := \text{eigenvals}(A) \quad C = \begin{bmatrix} 1653.1129 \\ 846.8871 \end{bmatrix} \quad B22 := C_0 \quad B33 := C_1$$

$$Ys = 6928.2839 \quad B22 = 1653.1129 \quad B33 = 846.8871 \quad \alpha = -25.6701$$

$$x2 = 0.0221 \quad x3 = 0.1556$$

$$J1 := b22 + b33 \quad J2 := B22 + B33 \quad J1 = 2500 \quad J2 = 2500$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Ys = B2 \cdot X_2^2 + B3 \cdot X_3^2 \quad \text{или}$$

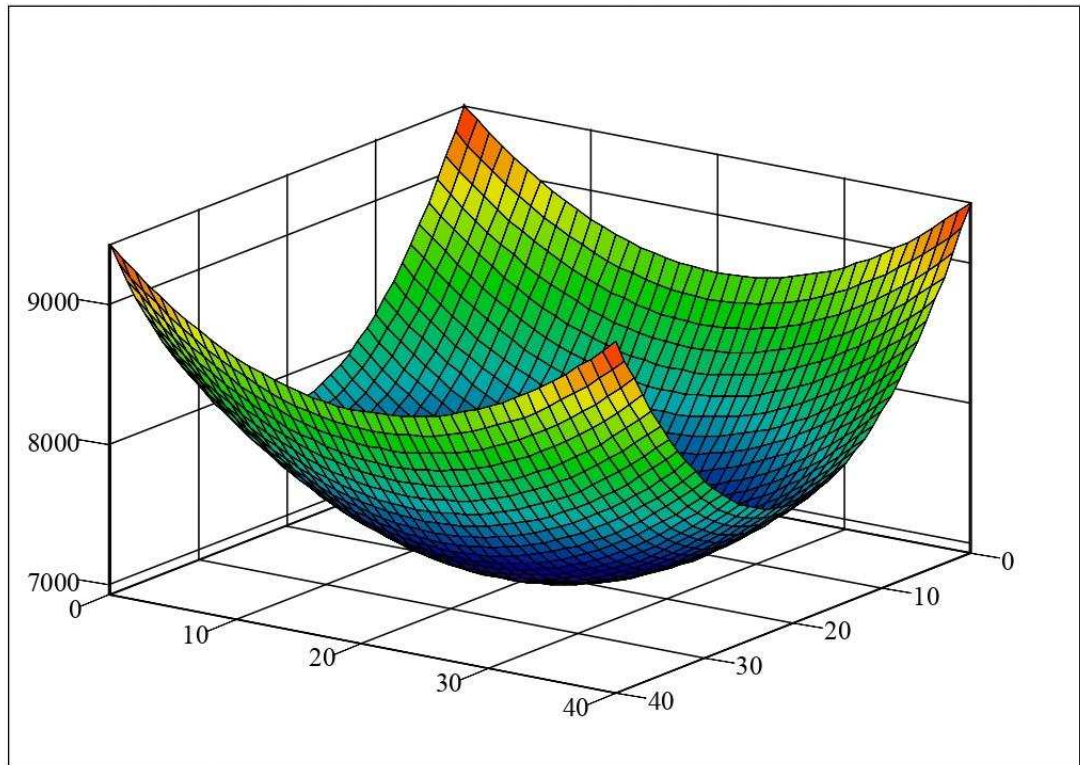
$$\frac{(X_2)^2}{\frac{Y - Ys}{B2}} + \frac{(X_3)^2}{\frac{Y - Ys}{B3}} = 1$$

$$kk := 40 \quad X2 := 0 .. kk \quad X3 := 0 .. kk$$

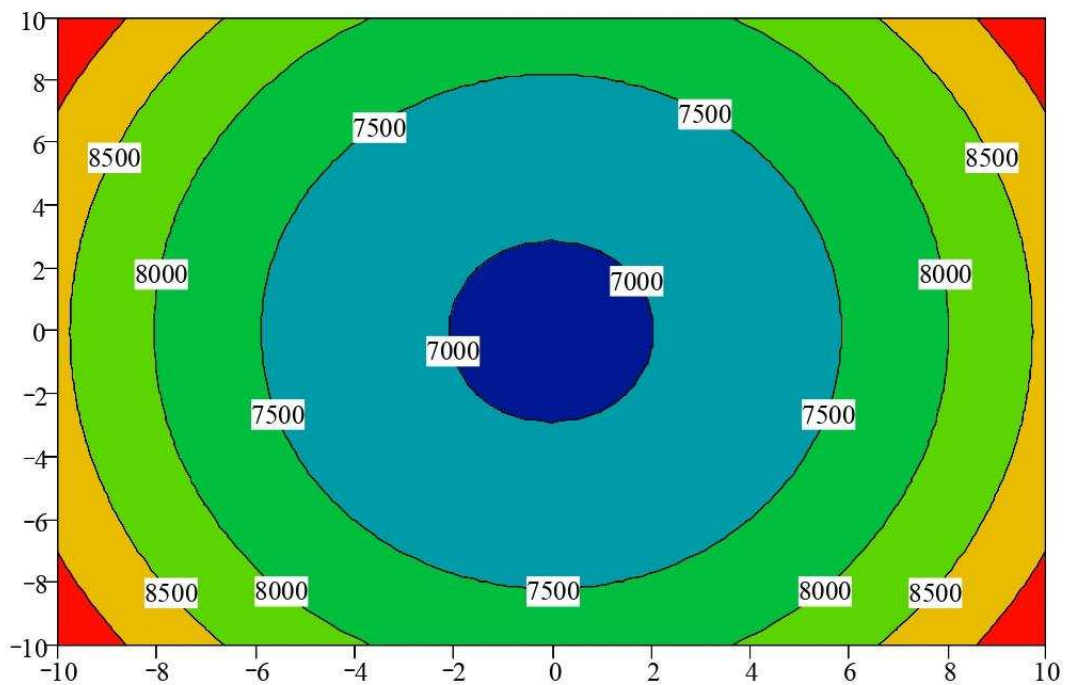
$$X22(X2) := -zp + 2 \cdot \frac{zp}{kk} \cdot X2 \quad X33(X3) := -zp + 2 \cdot \frac{zp}{kk} \cdot X3$$

$$z(X22, X33) := Ys + B22 \cdot X22(X2) \cdot X22(X2) + B33 \cdot X33(X3) \cdot X33(X3)$$

$$K_{X2, X3} := z(X22, X33)$$



K



K

Листинг программы
 "План Вк 3-х факторный Фишер"

ko := 14 n := ko - 1 n0 := 5 fl := n0 - 1 fl = 4

zp := 1 n = 13 j := 0 .. n0 - 1 zp := 1

Исходные данные

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{l}
 x1 := \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ zp \\ -zp \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 x2 := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ zp \\ -zp \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 x3 := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ zp \\ -zp \end{bmatrix} \\
 y := \begin{bmatrix} 9600 \\ 10300 \\ 9300 \\ 11000 \\ 9800 \\ 11000 \\ 9900 \\ 12100 \\ 7150 \\ 8600 \\ 8550 \\ 9000 \\ 7650 \\ 8300 \end{bmatrix} \\
 y1 := \begin{bmatrix} 7300 \\ 7000 \\ 7150 \\ 7200 \\ 6950 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \end{array}$$

b0 := 7125 b1 := -725 b2 := -205 b3 := -325

b12 := 250 b13 := 125 b23 := 100

b11 := 750 b22 := 1650 b33 := 850

c1 := 0.40625 c2 := 0.15625 c3 := 0.1 c4 := 0.125

c5 := 0.5 c6 := 0.0937 c7 := 0.00637 c8 := 0.011216

c9 := 0.0001015 c10 := 0.00163742

$$\begin{array}{l}
 \text{ys} := \left\{ \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 0 \\ \text{while } n0 - 1 \geq j \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} s \leftarrow s + \frac{y1_j}{n0} \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right. \\
 \text{s2y} := \left\{ \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 0 \\ \text{while } n0 - 1 \geq j \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} s \leftarrow s + (y1_j - \text{ys})^2 \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\text{ys} = 7120$$

$$\text{s2y} = 83000$$

$$\text{sy} := \sqrt{\frac{\text{s2y}}{n0 - 1}} \quad \text{sy} = 144.0486 \quad \text{При } a=0,05 \text{ и } f1=4 \quad t := 2.78$$

$$\text{sb0} := c7 \cdot \text{sy} \quad \text{sbi} := c8 \cdot \text{sy} \quad \text{sbij} := c9 \cdot \text{sy} \quad \text{sbii} := c10 \cdot \text{sy}$$

$$\text{sb0} = 0.9176 \quad \text{sbi} = 1.6156 \quad \text{sbij} = 0.0146 \quad \text{sbii} = 0.2359$$

$$\text{db0} := \text{sb0} \cdot t \quad \text{dbi} := \text{sbi} \cdot t \quad \text{dbij} := \text{sbij} \cdot t \quad \text{dbii} := \text{sbii} \cdot t$$

$$\text{db0} = 2.5509 \quad \text{dbi} = 4.4915 \quad \text{dbij} = 0.0406 \quad \text{dbii} = 0.6557$$

$$\begin{array}{l}
 \text{b0} := \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ if } |b0| < \text{db0} \\ b0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \quad \text{b1} := \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ if } |b1| < \text{dbi} \\ b1 \text{ otherwise} \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{b2} := \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ if } |b2| < \text{dbi} \\ b2 \text{ otherwise} \end{array} \right. \quad \text{b3} := \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ if } |b3| < \text{dbi} \\ b3 \text{ otherwise} \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{b12} := \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ if } |b12| < \text{dbij} \\ b12 \text{ otherwise} \end{array} \right. \quad \text{b13} := \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ if } |b13| < \text{dbij} \\ b13 \text{ otherwise} \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$b_{23} := \begin{cases} 0 & \text{if } |b_{23}| < db_{ij} \\ b_{23} & \text{otherwise} \end{cases} \quad b_{11} := \begin{cases} 0 & \text{if } |b_{11}| < db_{ii} \\ b_{11} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b_{22} := \begin{cases} 0 & \text{if } |b_{22}| < db_{ii} \\ b_{22} & \text{otherwise} \end{cases} \quad b_{33} := \begin{cases} 0 & \text{if } |b_{33}| < db_{ii} \\ b_{33} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Коэффициенты уравнения после проверки на значимость

$$b_0 = 7125 \quad b_1 = -725 \quad b_2 = -205 \quad b_3 = -325$$

$$b_{12} = 250 \quad b_{13} = 125 \quad b_{23} = 100$$

$$b_{11} = 750 \quad b_{22} = 1650 \quad b_{33} = 850$$

$$k_1 := 0 \quad k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_0 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_1 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_2 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_3 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{12} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{13} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{23} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{11} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{22} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 := \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{33} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 = 0 \quad f_2 := 10 - k_1 \quad f_2 = 10$$

$$ft := \begin{cases} 4.74 & \text{if } f2=10 \\ 4.706 & \text{if } f2=11 \\ 4.78 & \text{if } f2=9 \\ 4.82 & \text{if } f2=8 \\ 4.88 & \text{if } f2=7 \\ 4.95 & \text{if } f2=6 \\ 5.05 & \text{if } f2=5 \\ 5.19 & \text{if } f2=4 \\ 5.41 & \text{if } f2=3 \end{cases}$$
 $ft = 4.74$

При значимости $\alpha=0,05$

 $z := 0 \quad c := 0 \quad v := 0 \quad a := 0$

$$ssn := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 0 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \begin{cases} z \leftarrow z + b_0 + b_1 \cdot x_{1j} + b_2 \cdot x_{2j} + b_3 \cdot x_{3j} \\ c \leftarrow c + b_{12} \cdot x_{1j} \cdot x_{2j} + b_{13} \cdot x_{1j} \cdot x_{3j} + b_{23} \cdot x_{2j} \cdot x_{3j} \\ v \leftarrow v + b_{11} \cdot x_{1j} \cdot x_{1j} + b_{22} \cdot x_{2j} \cdot x_{2j} + b_{33} \cdot x_{3j} \cdot x_{3j} \\ a \leftarrow a + z + c + v \\ s \leftarrow s + (y_j - a)^2 \\ j \leftarrow j + 1 \end{cases} \\ s \end{cases}$$

$$s_{2n} := \frac{ssn}{f_2} \qquad fr := \frac{s_{2n}}{s_{2y}}$$

 $fr := 3.18 \qquad ft = 4.74$

Проверка на адекватность $fr < ft$