

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Нуриев Ленар Мидхатович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РАЗРАБОТКА РОТАЦИОННОГО
ОРУДИЯ С КОАКСИАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ РАБОЧИХ
ОРГАНОВ ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор
технических наук, доцент
Яхин Сергей Мирбатович

Казань – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	11
1.1 Классификация спирально-винтовых и игольчатых рабочих органов	11
1.2 Обзор конструкций ротационных почвообрабатывающих машин и орудий со спирально-винтовыми и игольчатыми рабочими органами.....	15
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОРУДИЯ	23
2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы.....	23
2.2 Определение и обоснование основных параметров спирально - винтового рабочего органа.....	26
2.2.1 Параметрические уравнения движения рабочего органа в пространстве.....	26
2.2.2 Определение и обоснование диаметра спирально-винтового рабочего органа.....	33
2.2.3 Определение и обоснование угла наклона образующей поверхности винтовой спирали (образующей геликоида).....	36
2.2.4 Определение и обоснование угла наклона витка спирально-винтового рабочего органа.....	38
2.2.5 Определение рабочей длины витка винтовой спирали.....	40
2.3 Определение и обоснование основных параметров эллипсоидного игольчатого диска ротационного почвообрабатывающего орудия.....	41
2.3.1 Параметрические уравнения движения игольчатого диска в пространстве.....	42
2.3.2 Обоснование диаметра эллипсоидного игольчатого диска.....	49
2.3.3 Определение и обоснование показателя кинематического режима работы эллипсоидного игольчатого диска.....	50
2.3.4 Определение и обоснование угла наклона ступицы игольчатого	

диска к оси вращения.....	54
2.3.5 Определение количества игл на эллипсовидном диске.....	56
2.3.6 Определение длины игл эллипсовидного диска по периметру ступицы.....	57
2.3.7 Определение угла наклона игл к оси вращения, угла закрепления игл на ступице диска и величины погружения игл в почву.....	62
2.3.8 Определение угла резания почвы.....	66
2.3.9 Определение толщины и площади почвенной стружки.....	71
2.3.10 Определение и обоснование диаметра иглы	73
2.3.11 Расстановка игольчатых дисков на валу.....	76
2.4 Теоретическое определение тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия.....	78
3 ПРОГРАММА, ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	88
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	88
3.2 Разработка и изготовление опытного образца.....	89
3.3 Разработка методики экспериментального исследования.....	91
3.4 Приборы для определения физико-механических свойств почвы.....	95
3.5 Приборы для определения агротехнических показателей.....	96
3.6 Результаты экспериментального определения тягового сопротивления опытного образца.....	97
3.7 Результаты полевых испытаний опытного образца по оценке агротехнических показателей.....	106
4 ТЕХНИКО - ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ОРУДИЯ.....	111
4.1 Методика расчёта технико-экономической эффективности опытного образца орудия.....	111
4.2 Результаты расчёта технико-экономической эффективности	

опытного образца орудия.....	111
4.3 Результаты расчёта энергетической эффективности опытного образца орудия.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	134
Приложение А. Акт внедрения результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.....	135
Приложение Б. Акт испытания ротационного почвообрабатывающего орудия в полевых условиях.....	137
Приложение В. Акт об использовании результатов научно- исследовательских работ в учебном процессе.....	138
Приложение Г. Результаты расчёта конструктивных и технологических параметров эллипсоидного игольчатого диска.....	139
Приложение Д. Справка Казанского ГАУ.....	141
Приложение Е. Справка Казанского ГАУ.....	142
Приложение Ж. Копия патента РФ на полезную модель № 195364.....	143
Приложение З. К определению тягового сопротивления опытного образца...	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Для предпосевной обработки почвы широко применяются комбинированные почвообрабатывающие машины и орудия с ротационными рабочими органами [52, 122].

На современном этапе развития техники чётко прослеживается перспективная тенденция разработки комбинированных ротационных машин и орудий, которые содержат спирально-винтовые и игольчатые рабочие органы [2, 14, 16, 31, 34, 35, 41, 42, 66, 67, 123].

Рабочие органы располагаются (устанавливаются) на раме, как правило, последовательно друг за другом. В последние годы появились конструктивные разработки орудий с коаксиальным (от англ. *coaxial* – соосный) расположением рабочих органов. Существующие конструкции машин и орудий с последовательным расположением рабочих органов имеют большие габариты, сложны, материалоемки и энергоёмки. Машины и орудия с коаксиальным расположением рабочих органов устраняют эти недостатки. Они компактны, более маневренны, менее материалоемки и энергоёмки, однако вопросы коаксиальной компоновки различных конструктивных вариантов рабочих органов рассмотрены недостаточно и требуют дополнительных исследований и поэтому остаются на сегодняшний день актуальными.

Степень разработанности темы. Предлагаемое ротационное орудие для предпосевной обработки почвы (далее – ротационное почвообрабатывающее орудие) содержит коаксиально расположенные на раме спирально-винтовой и игольчатые рабочие органы. По этой причине в работе изучены и проанализированы теоретические исследования и научные труды, посвящённые разработке и обоснованию параметров ротационных почвообрабатывающих машин и орудий, которые содержат как спирально-винтовые, так и игольчатые рабочие органы.

Свой вклад в разработку и исследование ротационных почвообрабатывающих машин и орудий со спирально-винтовыми рабочими органами внесли Мармалюков В.П. [58], Гайнанов Х.С. [129], Галиуллин Ш.Р. [1], Мазитов Н.К.

[57], Лещанкин А.И. [54], Ермолко Е.В. [31], Матяшин Ю.И. [55], Наумов Л.Г. [66], Щукин С.Г. [131], Якимов Ю.В. [85, 124], Путрин А.С. [98], Акимов А.П. [7], Чаткин М.Н. [118], Избасарова З.И. [34], Абдрахманов Р.К. [41], Кузьмин М.В. [42], Шубин А.В. [119], Падальцин К.Д. [81], Булгариев Г.Г. [114], Юнусов Р.Г. [123], Голубев Д.А. [15], Яхин С.М. [79, 84], Голубев В.В. [16] и др.

Разработке и исследованию ротационных почвообрабатывающих машин и орудий, содержащих игольчатые рабочие органы, посвящены исследования Путрина А.С. [99], Конищева А.А. [44], Сапарова О. [108], Зиязетдинова Р.Ф. [33], Карпуши П.П. [38], Даценко Н.В. [29], Белокопытова А.В. [11, 13], Смирнова П.А. [87, 88, 104], Козырева Б.М. [35], Руцкого А.В. [90], Кислова А.А. [43], Мингалимова Р.Р. [60], Подолько П.М. [83], Латыпова Р.М. [51], Смирнова М.П. [89, 107], Сагалбекова Б.У. [106], Понамарева А.В. [82], Казакова В.И. [37], Валиева А.Р. [14], Булгариева Г.Г. [69], Сергунцова А.С. [130] и др.

Теоретические исследования, конструкторские разработки и научные труды указанных выше учёных явились базой при разработке конструкции ротационного почвообрабатывающего орудия и обосновании его основных параметров.

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в повышении качества и эффективности предпосевной обработки почвы путём разработки и обоснования параметров ротационного почвообрабатывающего орудия с коаксиально расположенными на раме спирально-винтовым и игольчатыми рабочими органами. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Обосновать конструктивные, кинематические и технологические параметры коаксиально расположенных на раме спирально-винтового и игольчатых рабочих органов ротационного почвообрабатывающего орудия;

2. Разработать конструктивно - технологическую схему ротационного почвообрабатывающего орудия с коаксиальным расположением на раме спирально-винтового и игольчатых рабочих органов;

3. Исследовать процесс взаимодействия спирально-винтового и игольчатого рабочих органов с почвой и определить тяговое сопротивление ротационного почвообрабатывающего орудия в полевых условиях;

4. Испытать ротационное почвообрабатывающее орудие в полевых условиях и определить агротехнические показатели его работы;

5. Оценить технико - экономическую и энергетическую эффективность использования ротационного почвообрабатывающего орудия.

Научная новизна.

1. Разработана конструктивно - технологическая схема ротационного почвообрабатывающего орудия, позволяющего производить за один проход рыхление, крошение почвы, разрушение комков, уплотнение семенного ложа, мульчирование и выравнивание поверхности поля.

2. Получены теоретические зависимости для определения скорости и ускорения точек режущей кромки спирально-винтового и игольчатых рабочих органов, а также рационального значения показателя кинематического режима.

3. Получены теоретические зависимости для определения и обоснования рациональных конструктивных, кинематических и технологических параметров спирально-винтового и игольчатых рабочих органов.

4. Разработана математическая модель технологического процесса предпосевной обработки почвы, позволяющая определить рациональные значения поступательной скорости агрегата и частоты вращения эллипсоидных игольчатых дисков.

Техническая новизна ротационного почвообрабатывающего орудия подтверждена патентом Российской Федерации на полезную модель № 195364.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты теоретических исследований служили основой при разработке, проектировании и изготовлении опытного образца ротационного почвообрабатывающего орудия с коаксиально расположенными на раме спирально-винтовым и игольчатыми рабочими органами с рациональными конструктивными, кинематическими и технологическими параметрами. Научные положения, выводы и результаты исследований могут быть использованы проектно-конструкторскими организациями при разработке перспективных ротационных почвообрабатывающих машин и орудий.

Методология и методы исследования. В теоретических исследованиях использовались базовые законы и методы земледельческой механики, основы математического анализа, аналитической геометрии, теоретической механики и сопротивления материалов. Экспериментальные исследования выполнены на основе планирования многофакторного эксперимента и регрессионного анализа опытных данных с использованием компьютерных программ Statistica и Matlab.

Положения, выносимые на защиту.

1. Теоретические зависимости для определения и обоснования конструктивных, кинематических и технологических параметров рабочих органов ротационного почвообрабатывающего орудия.

2. Конструктивно – технологическая схема ротационного почвообрабатывающего орудия с коаксиально расположенными на раме спирально-винтовым и игольчатыми рабочими органами.

3. Результаты экспериментального исследования по определению тягового сопротивления опытного образца ротационного почвообрабатывающего орудия в полевых условиях.

4. Результаты экспериментального исследования опытного образца ротационного почвообрабатывающего орудия по определению агротехнических показателей работы в полевых условиях.

5. Техничко - экономическая и энергетическая эффективность опытного образца ротационного почвообрабатывающего орудия.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на научно-практической конференции «Prední vedecke novinky – 2012» (г. Прага, 2012 г.), Международной научно-практической конференции «Проблемы развития научного потенциала и направления его повышения» (г. Магнитогорск, 2023 г.) и Всероссийской научно-практической конференции «Система научных ценностей Российского общества: междисциплинарные исследования» (г. Саратов, 2023 г.). Результаты работы экспонировались на Международной специализированной выставке «Агрокомплекс: Интерагро. Анимед. Фермер Поволжья» (г. Казань,

2017 г.), а также на Международной агропромышленной выставке «АГРОВОЛГА – 2022» (г. Казань, 2022 г.).

Публикации. По материалам диссертации автором опубликовано 11 печатных работ, из них 5 статей, входящие в перечень научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья в рецензируемом журнале наукометрической базы данных Scopus, 4 работы – в материалах научно-практических конференций, а также 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора заключается в анализе современного состояния объекта исследования, разработке конструктивно-технологической схемы почвообрабатывающего орудия, теоретическом обосновании параметров, в разработке и изготовлении экспериментального образца почвообрабатывающего орудия и испытании его в полевых условиях, обработке экспериментальных данных, подготовке публикаций по диссертационной работе.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует п.5 Мобильные и стационарные энергетические средства, машины, агрегаты, рабочие органы и исполнительные механизмы, п. 6 Методы и средства оптимизации технологий, параметров и режимов работы машин и оборудования, п. 14 Научные основы конструирования и создания новых машин, агрегатов, рабочих органов, исполнительных механизмов паспорта научной специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Достоверность результатов исследований. Степень достоверности работы подтверждена результатами теоретических исследований, результатами экспериментальных исследований ротационного почвообрабатывающего орудия, проведённых в полевых условиях с применением современного оборудования и измерительной аппаратуры, сходимостью результатов исследований с аналогичными работами.

Объект исследований – технологический процесс предпосевной обработки почвы ротационным почвообрабатывающим орудием с коаксиально расположенными рабочими органами.

Предмет исследования – закономерности влияния конструктивных, кинематических и технологических параметров ротационного почвообрабатывающего орудия на качество предпосевной обработки почвы.

Реализация результатов исследований. Разработанное ротационное почвообрабатывающее орудие внедрено в КФХ ИП Вафин Р.К Лаишевского района Республики Татарстан. Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ».

Объём и структура диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 145 страницах машинописного текста и включает 57 рисунков, 12 таблиц и 8 приложений. Библиографический список включает 135 наименований цитируемых работ российских и зарубежных авторов.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Классификация спирально - винтовых и игольчатых рабочих органов

Спирально-винтовые рабочие органы (далее – СВРО) являются универсальными, поскольку в одной конструкции объединяются два признака: угол наклона рабочего органа к вертикали и угол установки его к линии поступательного движения (угол атаки). Спиральные рабочие органы выполняются, как правило, винтовыми. Здесь уместно будет подчеркнуть, что кроме винтовой спирали, существуют ещё в технике Архимедова, логарифмическая и другие спирали [30].

Согласно исследованиям проф. Голубева В.В. [16] СВРО по технологическому признаку подразделяются (рисунок 1.1) на рыхлительные, прикатывающие, прикатывающе-рыхлительные и рыхлительно-прикатывающие деформаторы. В конструктивном плане – это бороны; катки; катки-бороны и бороны-катки соответственно.

Предлагаемое ротационное почвообрабатывающее орудие по технологическому признаку относится к прикатывающе-рыхлительному деформатору комбинированного принципа действия и включает в себя коаксиально расположенные на раме спирально-винтовой и игольчатые рабочие органы.

Такая конструктивная комбинация рабочих органов выдвигает задачу рассмотрения классификации как спирально-винтовых, так и игольчатых почвообрабатывающих рабочих органов.

По геометрии исполнения СВРО бывают цилиндрическими и коническими.

По конструктивному исполнению существует на практике большая разновидность СВРО: вальные; безвальные; с правой, левой и комбинированной навивками витков спиралей; с постоянным и регулируемым шагом винта; в виде однозаходных и многозаходных винтов.

СВРО бывают активного, пассивного и комбинированного принципа действий. Они располагаются (устанавливаются) на раме последовательно друг за другом и коаксиально.

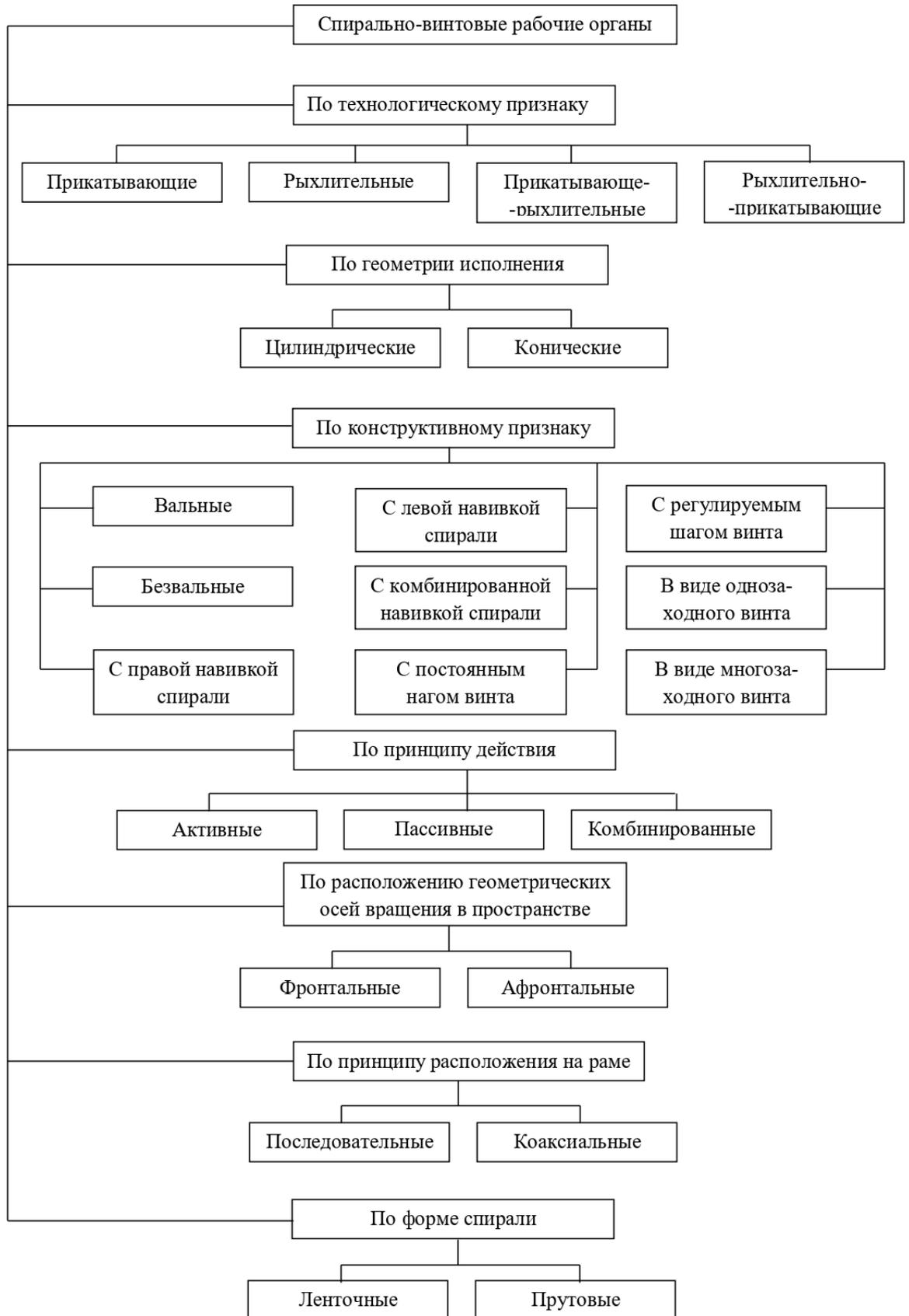


Рисунок 1.1 – Классификация спирально-винтовых рабочих органов

Геометрические оси вращения СВРО располагаются в пространстве фронтально (горизонтально) и афронтально (с углом атаки).

Спирали СВРО бывают ленточными и прутковыми. Ленточные спирали выполняются в виде прямого и косоугольного геликоидов. Поперечное сечение прутковых спиралей выполняются в виде окружности, квадрата, шестигранника и т. д.

Классификация игольчатых почвообрабатывающих рабочих органов учитывает конструктивные разработки последних лет и представлена на рисунке 1.2.

Игольчатые рабочие органы (далее – ИГРО) обеспечивают меньшее распыление и истирание почвы и не забиваются растительными остатками и почвой даже при повышенной влажности [45, 133, 134, 135]. Тяговое сопротивление их значительно меньше, чем у других почвообрабатывающих рабочих органов [117].

По принципу действия ИГРО бывают активными и пассивными, а по геометрии исполнения – круглыми, эллипсоидными и коническими.

Эллипсоидные ИГРО – активного (мульчирующего) действия, разработаны нами и образуют новую подгруппу игольчатых рабочих органов.

В конических ИГРО иглы располагаются по образующим конуса [44] или перпендикулярно к ним.

Существуют также ИГРО, круглые диски которых устанавливаются на косоугольной втулке и совершают дополнительные колебательные движения в продольно-поперечной плоскости [35]. Аналогичную конструкцию, разработчики которой назвали шаткой бороной, выпускает немецкая фирма RAU [121].

С учётом агротехнических требований ИГРО вращаются «сверху вниз» и «снизу вверх».

ИГРО располагаются (устанавливаются) на раме последовательно друг за другом и коаксиально.

Геометрические оси вращения ИГРО располагаются в пространстве фронтально (горизонтально), афронтально (с углом атаки), а также афронтально и с углом наклона к вертикали одновременно. Иглы рабочих органов выполняются прямолинейными и криволинейными. Исходя из конкретных условий, прямоли-

нейные иглы располагаются на диске радиально, а также с наклоном «назад» и с наклоном «вперёд» [61].

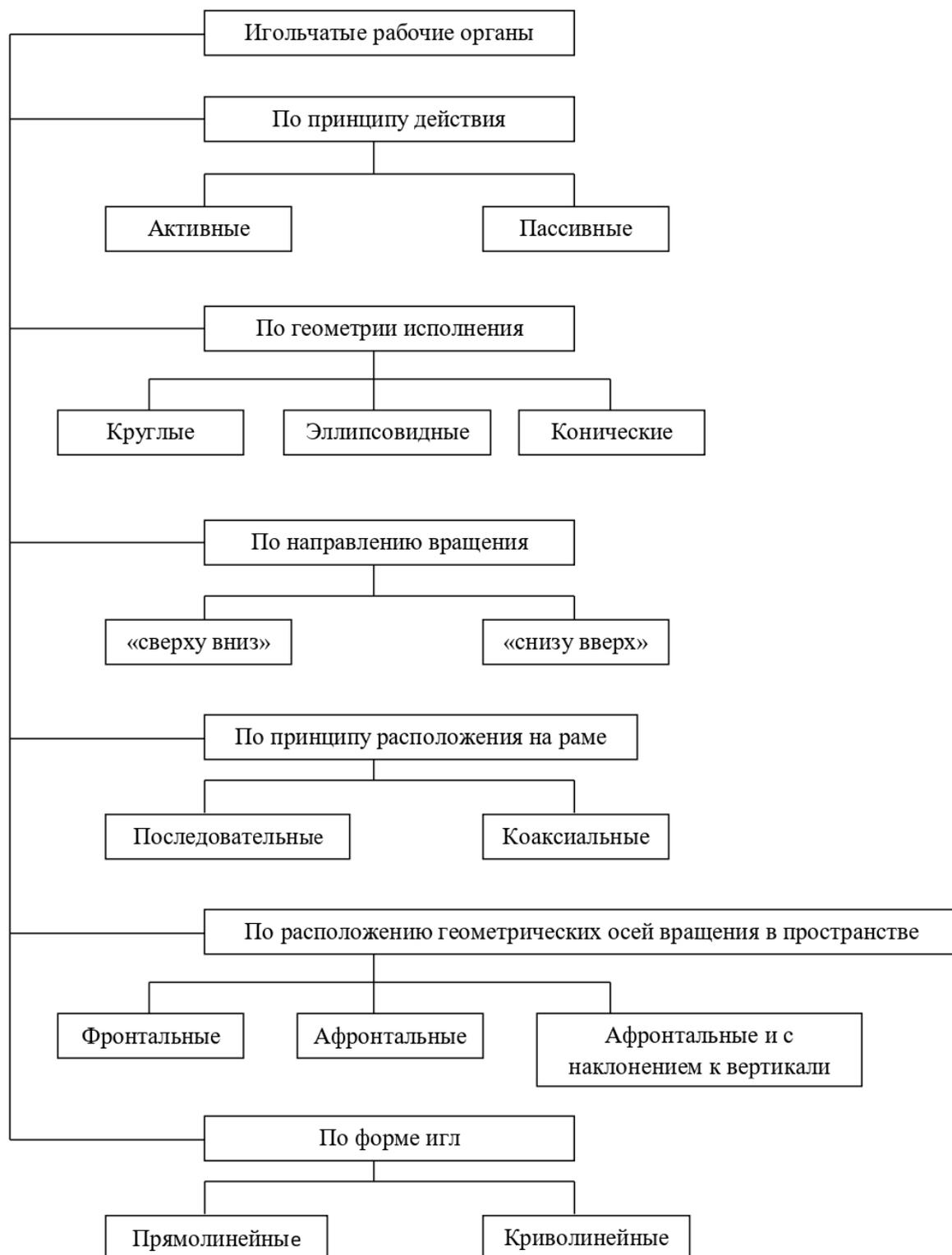


Рисунок 1.2 – Классификация игольчатых рабочих органов

В свою очередь, криволинейные иглы выполняются в виде эвольвенты, циклоиды, части круга, логарифмической и Архимедовой спиралей.

1.2 Обзор конструкций ротационных почвообрабатывающих машин и орудий со спирально - винтовыми и игольчатыми рабочими органами

Ниже рассматриваются конструкции существующих и применяемых в производстве ротационных почвообрабатывающих орудий с коаксиально расположенными рабочими органами. При описании конструкций таких почвообрабатывающих орудий авторы не применяют термин «коаксиальный». Однако при этом подчёркивается, что ротационные рабочие органы вставлены друг в друга соосно, что, по сути, означает коаксиальное их расположение на раме. В других отраслях техники этот термин применяется очень широко, например, коаксиальные трубы, коаксиальные пружины, коаксиальные дымоходы, коаксиальные кабели, коаксиальные динамики, коаксиальные сепарирующие устройства, коаксиальные мультикоптеры (летательные аппараты) и т. д.

Проф. Кузьмин М.В. в разные годы разработал различные конструкции сельскохозяйственных машин с нетрадиционными рабочими органами. В своей диссертационной работе [42] он приводит следующую конструкцию почвообрабатывающего орудия (рисунок 1.3).

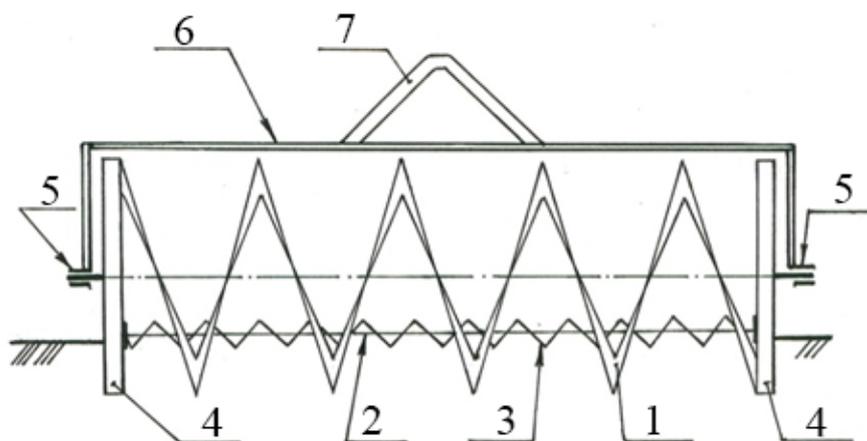


Рисунок 1.3 – Схема почвообрабатывающего орудия: 1 – спирально-винтовой рабочий орган; 2 – вал шнека; 3 – шнек; 4 – механизм привода рабочих органов; 5 – подшипники; 6 – рама; 7 – механизм навески

Оно состоит из безвального спирально-винтового рабочего органа 1 и эксцентрично установленного внутри него вального спирального рабочего органа (шнека) 3. Орудие включает также механизм привода 4 рабочих органов, подшипниковые опоры 5, раму 6 и механизм навески 7. При поступательном движении орудия рабочий орган 1 заглубляется в почву и крошит её. Улучшению крошения почвы и уравниванию боковых усилий способствует шнек 3, который имеет навивку, противоположную навивки спирально-винтового рабочего органа 1. Здесь конструкция механизмов привода 4 не раскрыта. По сообщению автора, привод рабочих органов осуществляется при помощи известных в технике различных механизмов и передач.

Однако когда ротационные рабочие органы вставляются друг в друга не концентрично, а с эксцентриситетом, весьма проблематично осуществить их привод от одного источника. В свою очередь это не только чрезмерно усложняет конструкцию привода, но и резко снижает работоспособность и надёжность агрегата.

Аналогичное ротационное орудие, которое одновременно выполняет операции прикатывания почвы и образования противоэрозионных лунок было разработано Бурковым Л.Н. [93] (рисунок 1.4).

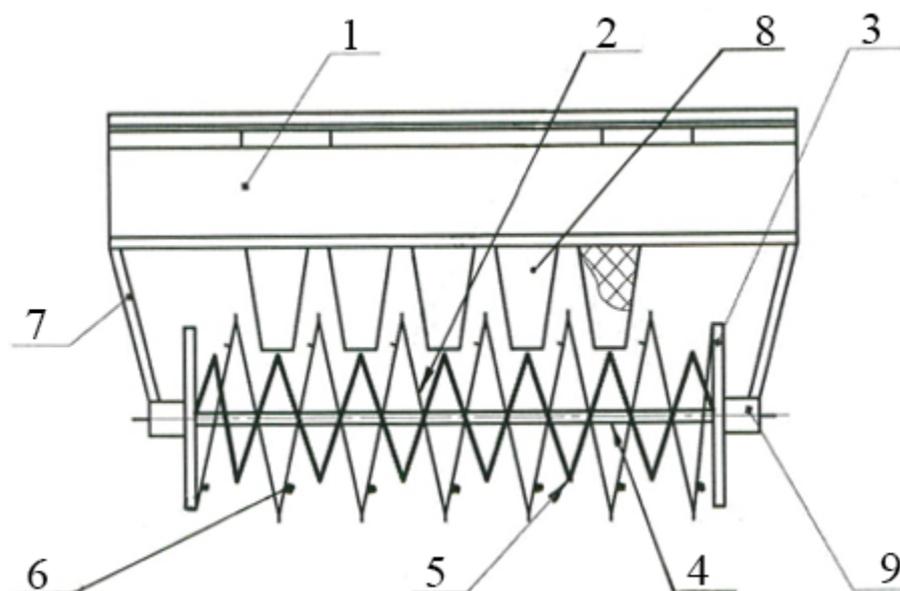


Рисунок 1.4 – Схема ротационного орудия с коаксиально установленными на раме спирально-винтовыми рабочими органами: 1 – ящик для балласта; 2 – наружная спираль; 3 – плоские диски; 4 – ось; 5 – внутренняя спираль; 6 – лопатки; 7 – рама; 8 – чистики; 9 – подшипниковые опоры

Внутренняя спираль 5 орудия жёстко закреплена на оси 4 по всей длине, т. е. выполнена в виде шнека. Витки же наружной спирали 2 установлены свободно. При поступательном движении агрегата орудие обеспечивает образование лунок, следовательно, улучшает противэрозионную устойчивость почвы.

Однако свободное закрепление наружной спирали нарушает динамическую устойчивость работы, что может привести к поломкам элементов конструкции.

Сотрудниками НПО «Целинсельхозмеханизация» было разработано почвообрабатывающее орудие [3] с прутковыми барабанами 1 и 3 (рисунок 1.5).

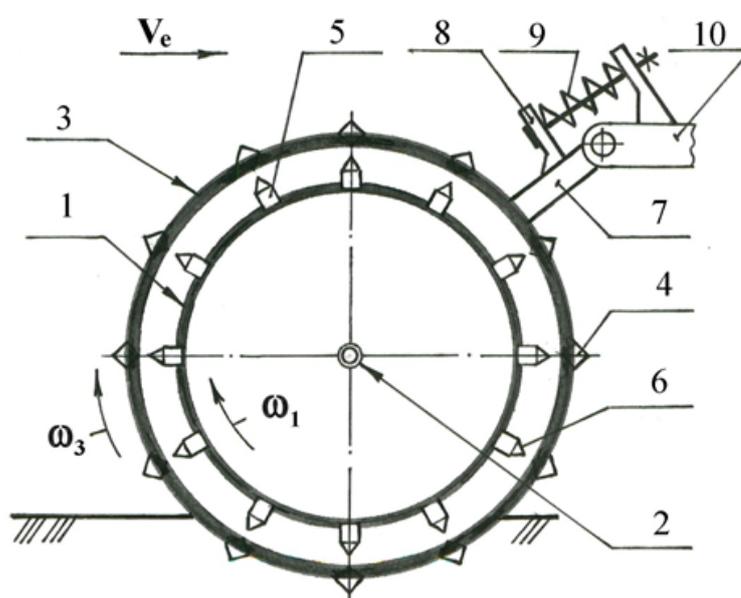


Рисунок 1.5 – Почвообрабатывающее орудие с коаксиально установленными на раме прутковыми барабанами: 1, 3 – внутренний и наружный барабаны; 2 – ось; 4, 5 – прутки; 6 – иглы; 7 – рама орудия; 8 – механизм навески; 9 – пружинный узел; 10 – рама агрегата

Прутки 4 наружного барабана 3 в поперечном сечении выполнены в виде усечённого квадрата и установлены к оси 2 под углом $15^\circ - 30^\circ$.

Прутки 4 наружного барабана 3 расположены здесь не по винтовой линии, а по образующим однополостного гиперboloида. Общеизвестно, что расстояние от оси вращения до точек образующих однополостного гиперboloида является переменной величиной. По этой причине орудие неравномерно обрабатывает почву и плохо выравнивает её поверхность.

В Южно-Уральском государственном аграрном университете (ГАУ) группой учёных и сотрудников под руководством Поликутина Н.Г. было разработано почвообрабатывающее орудие [112], которое прошло хозяйственные испытания в полевых условиях Челябинской области (рисунок 1.6).

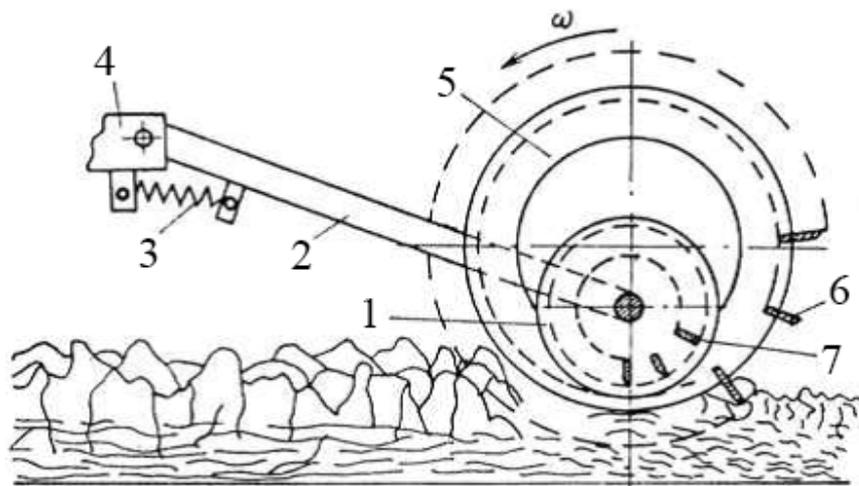


Рисунок 1.6 – Конструктивная схема почвообрабатывающего орудия: 1, 5 – внутренний и наружный барабаны; 2 – шарнирный поводок; 3 – пружинный догрузатель; 4 – рама культиватора; 6, 7 – радиальные планки барабанов

Здесь планчатый барабан 1 эксцентрично установлен внутри планчатого барабана 5. Орудие прицепляется на раму 4 культиватора. Комки разрушаются планками 6, а более мелкие почвенные комки разрушаются между планками 6 и 7 наружного и внутреннего барабанов.

Однако орудие имеет низкую надёжность, поскольку в результате частых соударений барабанов происходит износ и деформация планок.

В Курском государственном техническом университете было разработано почвообрабатывающее орудие с игольчатыми и спирально-винтовыми рабочими органами (рисунок 1.7) [90].

Орудие состоит из последовательно расположенных на раме двух параллельных валов со спирально-винтовыми рабочими органами 2 и 3, валы которых кинематически соединены между собой посредством цепной передачи 4.

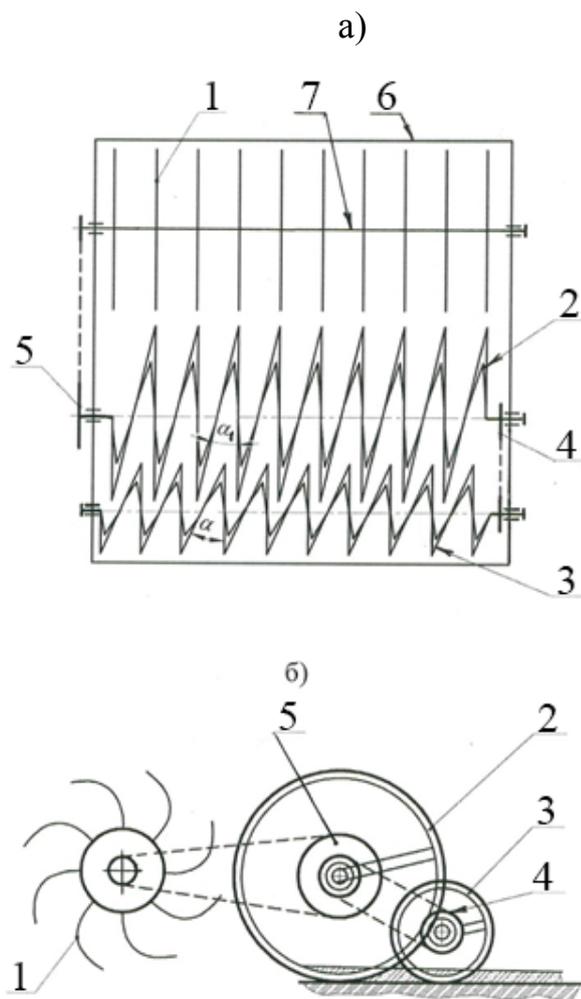


Рисунок 1.7 – Схема ротационного почвообрабатывающего орудия (а – вид сверху; б – в рабочем положении): 1 – диски игольчатые; 2, 3 – спирально-винтовые рабочие органы; 4 – синхронизирующая цепная передача; 5 – цепная передача привода; 6 – рама орудия; 7 – вал

Орудие также содержит вал 7 с игольчатыми дисками 1 и цепную передачу 5. Заметим, что здесь диаметры и углы наклона спирально-винтовых рабочих органов разные, а витки спирали 3 конструктивно заходят в межвитковое пространство спирали 2.

Очевидно, что при такой конструктивной компоновке спирали 2 и 3 задевают друг друга, что приводит к нарушению технологического процесса.

Группой учёных Тверской государственной сельскохозяйственной академии под руководством проф. Голубева В.В. было разработано ротационное орудие для рыхления, выравнивания и частичного уплотнения почвы [92] (рисунок 1.8).

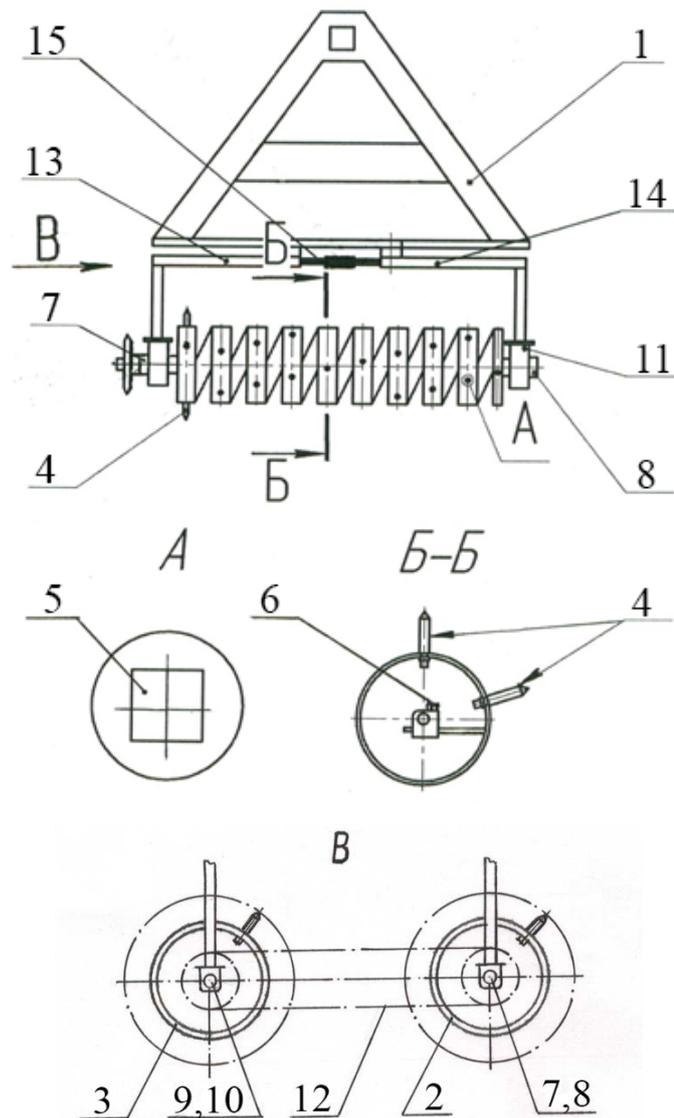


Рисунок 1.8 – Схема ротационного почвообрабатывающего орудия: 1 – рама с навесным устройством; 2, 3 – спирально-винтовые рабочие органы; 4 – зубья; 5 – гнездо зуба; 6 – болтовые соединения; 7, 8, 9, 10 – оси; 11 – подшипники; 12 – цепная передача; 13, 14, 15 – винтовая пара

Орудие содержит раму 1 и спирально-винтовые рабочие органы 2 и 3, спирали которых выполнены из полосы шириной не менее 20 мм. Навивка спиралей выполнена таким образом, что большая сторона полосы параллельна оси вращения рабочих органов. Каждый спирально-винтовой рабочий орган выполнен с зубьями 4 на её витках, а направление навивки последующей спирали противоположно направлению навивки предыдущей. Концы спиралей закреплены при по-

мощи болтовых соединений 6. Рабочие органы 2 и 3 связаны между собой посредством цепной передачи 12. Рама 1 выполнена с возможностью изменения ширины захвата орудия при помощи винтовой пары 13, 14 и 15. Рабочие органы 2 и 3, соприкасаясь с почвой своими зубьями 4, вращаются и одновременно совершают вибрации в осевом направлении, следовательно, разрыхляют почву, уплотняют приповерхностный слой почвы – семенное ложе.

Однако при прочих равных условиях тяговое сопротивление орудия выше, поскольку витки спирально-винтовых рабочих органов из-за специфики навивок спиралей входят в почву не со скольжением, а вдавливанием.

В заключении для полноты анализа отметим, что в нашей стране в разные годы была разработана серия почвообрабатывающих орудий, которые содержат спирально-винтовые рабочие органы.

В качестве наиболее значимых примеров отметим конструкцию почвообрабатывающего орудия, которое разработано Жуком А.Ф. [97], почвообрабатывающее орудие конструкции Вятской государственной сельскохозяйственной академии [86] и почвообрабатывающее орудие, выполняющее операции боронования и прикатывания почвы за один проход конструкции научно-производственной фирмы «Агромаш» (г. Новосибирск) [94].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Машины и орудий для предпосевной обработки почвы широко применяются при возделывании многих сельскохозяйственных культур, поскольку обеспечивают повышение производительности труда, экономию материальных и энергетических ресурсов;
2. За последние десятилетия в нашей стране ведутся активные исследования по разработке ротационных почвообрабатывающих машин и орудий, в состав которых входят спирально-винтовые и (или) игольчатые рабочие органы;
3. В конструктивном плане рабочие органы ротационных машин и орудий располагаются (устанавливаются) на раме последовательно друг за другом и коаксиально:

4. Анализ показал, что существующие конструкции машин и орудий с последовательной установкой рабочих органов имеют большие габариты, сложны, материалоемки и энергоёмки;

5. Разработанные же почвообрабатывающие машины и орудия с коаксиально расположенными рабочими органами имеют ряд недостатков:

- невозможность работы двух ротационных рабочих органов от одного источника привода;

- свободное закрепление на валу батареи рабочих конструктивных элементов нарушает динамическую устойчивость работы;

- периодическое соударение ротационных рабочих органов снижает эксплуатационную надёжность и нарушает технологический процесс обработки почвы;

- выполнение конструкций рабочих органов без учёта выполнения условия скользящего резания почвенно-растительной массы приводит к увеличению тягового сопротивления орудия.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОРУДИЯ

2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы

Группой учёных и сотрудников Казанского ГАУ под руководством проф. Яхина С.М. разработана серия ротационных почвообрабатывающих орудий, которые содержат спирально-винтовые рабочие органы [67, 79, 84, 86, 96]. Они решают задачу энерго и ресурсосбережения.

Развивая данное направление и в целях обеспечения более полного выполнения агротехнических требований, предъявляемых к предпосевной обработке почвы, а также устранения отдельных недостатков, выявленных в подразделе 1.4, а именно для повышения динамической устойчивости и обеспечения скользящего резания почвенно-растительной массы было разработано ротационное почвообрабатывающее орудие [47, 95, 126] (рисунок 2.1), которое содержит коаксиально расположенные на раме спирально-винтовой и игольчатые рабочие органы.

Спирально-винтовой рабочий орган орудия безвальный и выполнен в виде ленточной спирали. Каждый виток спиральной ленты представляет собой наклонный (косой) геликоид [30].

Коаксиально установленные игольчатые рабочие органы орудия выполнены эллипсовидными. Поэтому конечные точки игл совершают при работе сложное перемещение в пространстве.

В зависимости от применяемой технологии предлагаемое почвообрабатывающее орудие, как правило, выполняется в виде модуля, который включается в состав различных агрегатов, например, культиваторных или почвообрабатывающе-посевных.

Почвообрабатывающее орудие, выполненное в виде модуля (рисунок 2.1) состоит из рамы 1 и механизма навески 2. На раме 1 на подшипниковых опорах 3 установлен горизонтальный вал 4. На валу 4 на подшипниковых опорах 5 установлены круглые боковые диски 6, на которых жёстко закреплена ленточная спи-

раль 7 прямоугольного поперечного сечения с левой и правой навивкой симметрично относительно соединительного кольца 8.

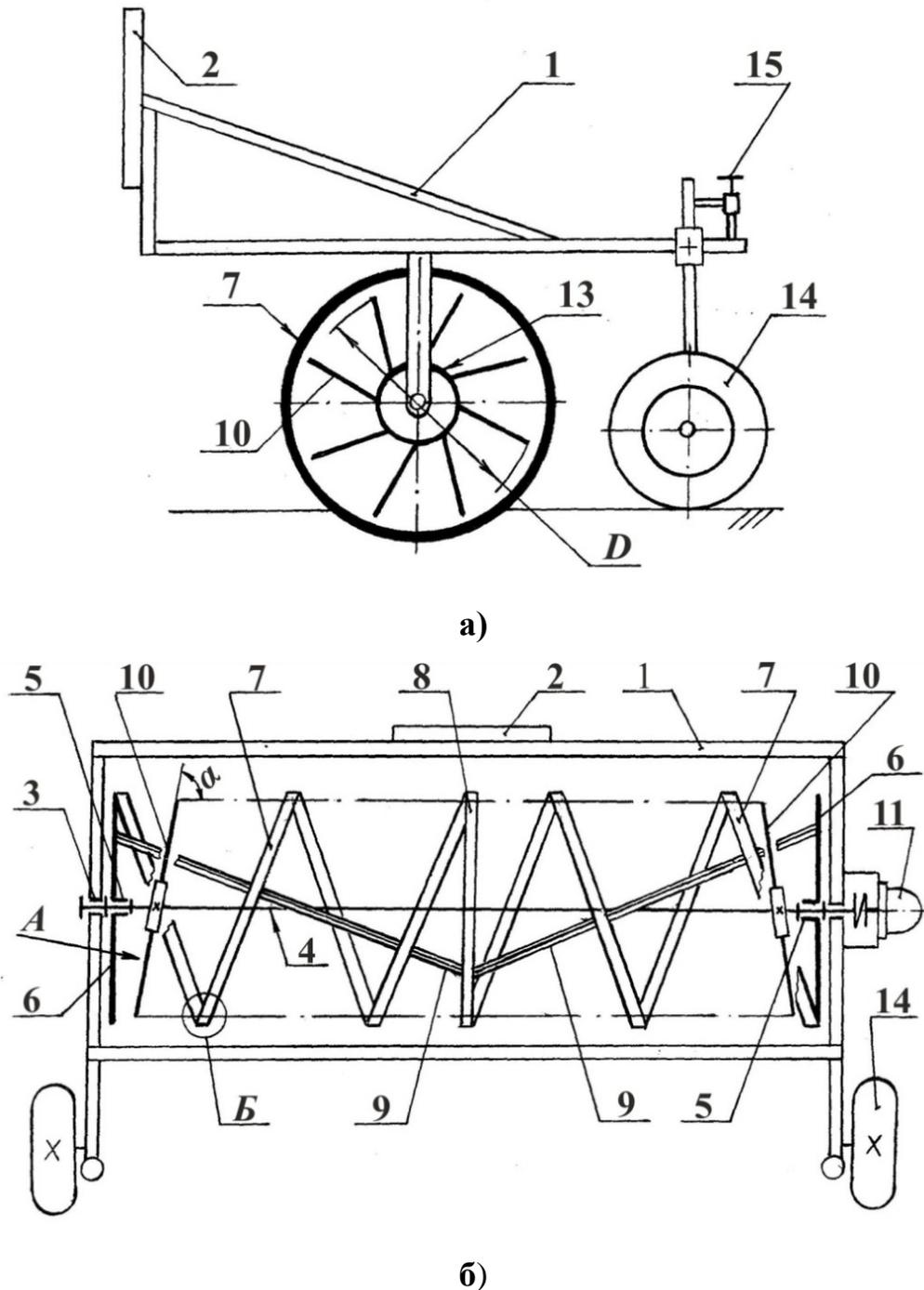


Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологическая схема ротационного орудия (а – рабочее положение; б – вид сверху): 1 – рама; 2 – механизм навески; 3 и 5 – подшипниковые опоры; 4 – вал; 6 – круглые боковые диски; 7 – ленточные спирали; 8 – соединительное кольцо; 9 – винтовые квадратные прутки; 10 – эллипсоидные игольчатые диски; 11 – гидромотор; 12 – игла диска; 13 – ступица диска; 14 – опорные колёса; 15 – винтовой механизм регулирования глубины обработки

Витки спирали 7 закреплены между собой, боковыми дисками 6 и соединительным кольцом 8 при помощи винтовых квадратных прутков 9. Образующая ленточной спирали 7 наклонена к поверхности почвы под углом. На валу 4 внутри спирально-винтового рабочего органа 7 коаксиально закреплены эллипсоидные игольчатые диски 10, которые объединены в секцию. Они приводятся во вращательное движение при помощи гидромотора 11, снабжённого дросселем-расходомером. Для самоочищения от растительных остатков иглы 12 установлены на ступице 13 с наклоном назад, т. е. здесь направление угла наклона игл противоположно направлению вращения дисков. Ротационное орудие содержит также опорные колеса 14 с винтовыми механизмами 15 для регулирования глубины обработки почвы.

При работе ленточные спирали 7 погружаются в почву. При этом режущие кромки спиральной ленты активно разрыхляют, крошат почву и разрушают комки, а рабочие их поверхности производят уплотнение прослойки почвы – семенного ложа. В то же время винтовые квадратные прутки 9, установленные своими рёбрами к поверхности почвы дополнительно разрушают комки, тем самым увеличивают крошение почвы и частично выравнивают поверхность поля. Одновременно гидромотор 11 приводит во вращение эллипсоидные игольчатые диски 10. Из-за конструктивной особенности эллипсоидные диски 10 совершают сложное колебательное движение. Благодаря растаскивающему эффекту игл, сорные растения вычёсываются на поверхность, почва интенсивно мульчируется.

Таким образом, предлагаемое ротационное почвообрабатывающее орудие за один проход выполняет ряд операций: разрыхляет, крошит почву, разрушает комки, производит уплотнение семенного ложа, а также мульчирует и выравнивает обработанную поверхность. Уплотнённое семенное ложе обеспечивает лучший контакт семян с влажной почвой, следовательно, ускоренный стартовый рост растений. Созданный на поверхности мульчированный слой предотвращает испарение влаги и способствует к быстрому прорастанию семян.

2.2 Определение и обоснование основных параметров спирально-винтового рабочего органа

Спирально-винтовой рабочий орган предлагаемого ротационного почвообрабатывающего орудия работает в пассивном режиме.

Практика показывает, что наибольший эффект послойного прикатывания почвы достигается лишь тогда, когда ротационные рабочие органы работают в пассивном режиме. Перспективность пассивных спирально-винтовых рабочих органов для создания уплотнённого семенного ложа отмечается также в исследованиях проф. Мазитова Н.К. [57], Наумова Л.Г. [66], Якимова Ю.В. [124].

К конструктивным, кинематическим и технологическим параметрам спирально-винтового рабочего органа относятся: диаметр $D_{\text{св}}$; глубина a обработки почвы; скорость $V_{\text{е(св)}}$ поступательного движения; частота $n_{\text{св}}$ и угловая скорость $\omega_{\text{св}}$ вращения; угол ε наклона витка спирали (угол подъёма винтовой линии); количество витков $n_{\text{вит}}$ спирали; количество навивки $n_{\text{нав}}$ спирали; количество $n_{\text{прут}}$ винтовых квадратных прутков; геометрические размеры квадратных прутков; шаг $S_{\text{св}}$ и общая длина $L_{\text{св}}$ спирали; угол δ наклона образующей поверхности спирали (образующей геликоида) к поверхности почвы; длина l_p рабочего участка режущей кромки.

2.2.1 Параметрические уравнения движения рабочего органа в пространстве

Для выявления характера взаимодействия спирально-винтового рабочего органа с почвой рассмотрим кинематику движения отдельных произвольных его точек в пространстве [47, 132] (рисунок 2.2).

При рассмотрении данного вопроса отдельные исследователи [15, 31, 56, 114] начало и направление осей пространственной прямоугольной системы координат выбирают произвольно, более того ось аппликата располагают по горизонтали. На наш взгляд, это затрудняет сравнительный анализ полученных аналитических зависимостей в каждом конкретном случае.

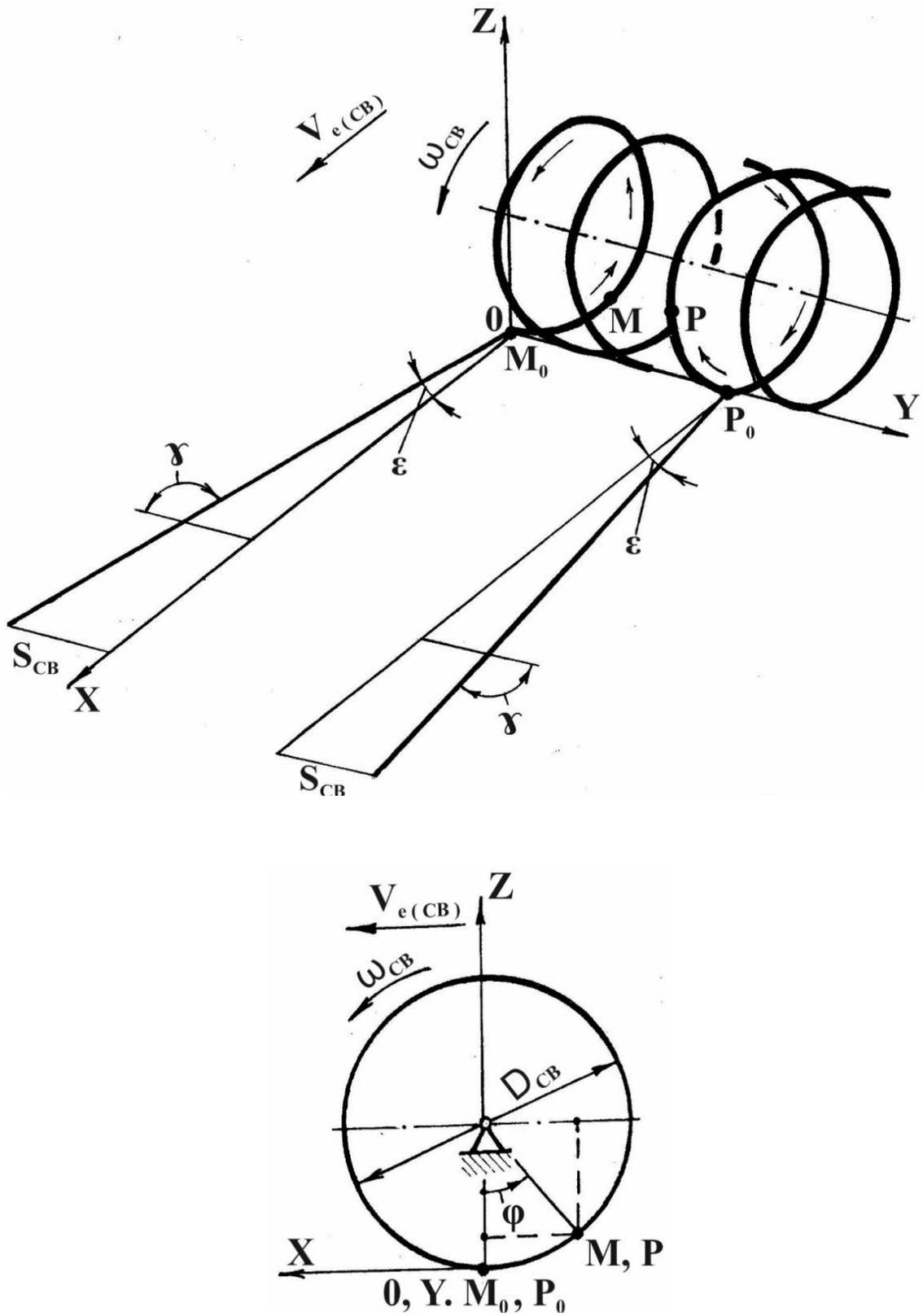


Рисунок 2.2 – Схема к исследованию кинематики рабочего органа

С учётом того, что спиральные рабочие органы относятся к классу ротационных почвообрабатывающих рабочих органов, при исследовании их кинематики нужно применять традиционные подходы [36] по выбору направления осей пространственной прямоугольной системы координат: ось аппликат Z должна быть направлена строго по вертикали, а ось абсцисс X – по направлению поступательной скорости агрегата. Ось ординат Y , следовательно, перпендикулярна к этим осям. В случае горизонтального расположения рабочего органа ось Y параллельна геометрической оси рабочего органа, либо совпадает с ней. При исследовании кинематики ротационных рабочих органов за начало координат принимается, как правило, крайнее нижнее положение рассматриваемой точки режущей кромки.

На первом этапе определяются поступательные скорости исследуемых точек. Далее методом аналитической геометрии определяются их координаты в пространственной прямоугольной системе координат и составляются соответствующие параметрические уравнения движения.

Пусть рабочий орган с диаметром $D_{\text{СВ}}$ перемещается поступательно по поверхности поля с постоянной скоростью $V_{e(\text{СВ})}$. Благодаря силе трения о почву он вращается вокруг оси вала с постоянной угловой скоростью $\omega_{\text{СВ}}$. В связи с тем, что спирально-винтовой рабочий орган почвообрабатывающего орудия выполнен пассивным, поступательная скорость $V_{e(\text{СВ})}$ точки M режущей кромки равна её окружной скорости $V_{o(\text{СВ})}$:

$$V_{e(\text{СВ})} = V_{o(\text{СВ})} = \omega_{\text{СВ}} D_{\text{СВ}} / 2, \quad (2.1)$$

где $D_{\text{СВ}}$, $\omega_{\text{СВ}}$ – диаметр и угловая скорость вращения спирально-винтового (СВ) рабочего органа.

Время движения данной точки определяется согласно известной зависимости: $t_M = \varphi / \omega_{\text{СВ}}$ (φ – угол поворота рабочего органа, радиан).

При заданных значениях диаметра винтовой спирали и поступательной скорости агрегата угловая скорость рабочего органа определяется по формуле:

$$\omega_{\text{СВ}} = 2 V_{e(\text{СВ})} / D_{\text{СВ}}. \quad (2.2)$$

При $D_{CB} = 0,47$ м, а также в случае агрегатирования трактора МТЗ-82 с предлагаемым орудием, когда трактор движется, например, на пятой пониженной передаче с поступательной скоростью $V_{e(CB)} = 8,2$ км /ч = 2,27 м /с, угловая скорость вращения винтовой спирали $\omega_{CB} = 2 \cdot 2,27 / 0,47 = 9,65$ с⁻¹. Следовательно, частота её вращения $n_{CB} = 30 \omega_{CB} / \pi = 30 \cdot 9,65 / 3,14 = 92,2$ мин⁻¹.

Напомним, что винтовая спираль предлагаемого ротационного почвообрабатывающего орудия выполнена из двух половин с одинаковыми конструктивными параметрами с правой и левой навивкой симметрично относительно вертикальной оси симметрии.

Параметрические уравнения движения произвольной точки M режущей кромки горизонтально установленного спирально-винтового рабочего органа, выполненного с **правой** навивкой («правый» винт) и составленные по указанной выше методике имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} X_M &= V_{e(CB)} t_M - D_{CB} \sin \varphi / 2 = D_{CB} (\varphi - \sin \varphi) / 2, \\ Y_M &= - D_{CB} \varphi \operatorname{tg} \varepsilon / 2, \\ Z_M &= D_{CB} (1 - \cos \varphi) / 2. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где ε – угол наклона витка винтовой спирали, градус.

Что касается произвольной точки P режущей кромки спирально-винтового рабочего органа, выполненного с **левой** навивкой («левый» винт), то параметрические уравнения (2.3) движения остаются без изменения, меняется лишь математический знак перед выражением для определения ординаты данной точки.

Таким образом, окончательные параметрические уравнения движения исследуемых точек запишутся в следующем виде, причём верхний знак здесь и в выражениях (2.6) и (2.10) для точки M «правого» винта, а нижний – для точки P «левого» винта:

$$\left. \begin{aligned} X_{M,P} &= D_{CB} (\varphi - \sin \varphi) / 2, \\ Y_{M,P} &= \mp D_{CB} \varphi \operatorname{tg} \varepsilon / 2, \\ Z_{M,P} &= D_{CB} (1 - \cos \varphi) / 2. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Величина перемещения исследуемых точек в пространстве за один и тот же промежуток времени равна между собой и определяется из уравнения:

$$\begin{aligned} S_{M,P} &= \sqrt{(X_{M,P})^2 + (Y_{M,P})^2 + (Z_{M,P})^2} = \\ &= D_{CB} \sqrt{\varphi^2(1 + tg^2 \varepsilon) + 2(1 - \varphi \sin \varphi - \cos \varphi)} / 2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Проекции скорости точек режущей кромки винтовой спирали можно вычислить путём дифференцирования выражения (2.4) по времени:

$$\left. \begin{aligned} V_{M,P}^X &= dX_{M,P} / dt = \omega_{CB} D_{CB} (1 - \cos \varphi) / 2 \\ V_{M,P}^Y &= dY_{M,P} / dt = \mp \omega_{CB} D_{CB} tg \varepsilon / 2, \\ V_{M,P}^Z &= dZ_{M,P} / dt = \omega_{CB} D_{CB} \sin \varphi / 2. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Модуль (величина) абсолютной скорости исследуемых точек режущей кромки, т. е. скорость резания почвы режущими кромками винтовой спирали определяется согласно выражению:

$$V_{M,P} = \sqrt{(V_{M,P}^X)^2 + (V_{M,P}^Y)^2 + (V_{M,P}^Z)^2} = \omega_{CB} D_{CB} \sqrt{2(1 - \cos \varphi) + tg^2 \varepsilon} / 2. \quad (2.7)$$

Дифференцирование выражения (2.6) по времени даёт проекции ускорения исследуемых точек режущей кромки:

$$\left. \begin{aligned} a_{M,P}^X &= dV_{M,P}^X / dt = \omega_{CB}^2 D_{CB} \sin \varphi / 2, \\ a_{M,P}^Y &= dV_{M,P}^Y / dt = 0, \\ a_{M,P}^Z &= dV_{M,P}^Z / dt = \omega_{CB}^2 D_{CB} \cos \varphi / 2. \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Модуль абсолютного ускорения этих точек определяется по формуле, которая имеет следующий вид:

$$a_{M,P} = \sqrt{(a_{M,P}^X)^2 + (a_{M,P}^Y)^2 + (a_{M,P}^Z)^2} = \omega_{CB}^2 D_{CB} / 2. \quad (2.9)$$

Направляющие косинусы векторов скорости и ускорения определяются согласно выражениям:

$$\left. \begin{aligned}
 K_X^{V_{M,P}} &= V_{M,P}^X / V_{M,P} = \\
 &= (1 - \cos \varphi) / \sqrt{2(1 - \cos \varphi) + tg^2 \varepsilon}, \\
 K_Y^{V_{M,P}} &= V_{M,P}^Y / V_{M,P} = \\
 &= \mp tg \varepsilon / \sqrt{2(1 - \cos \varphi) + tg^2 \varepsilon}, \\
 K_Z^{V_{M,P}} &= V_{M,P}^Z / V_{M,P} = \\
 &= \sin \varphi / \sqrt{2(1 - \cos \varphi) + tg^2 \varepsilon}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{aligned}
 K_X^{a_{M,P}} &= a_{M,P}^X / a_{M,P} = \sin \varphi, \\
 K_Y^{a_{M,P}} &= a_{M,P}^Y / a_{M,P} = 0, \\
 K_Z^{a_{M,P}} &= a_{M,P}^Z / a_{M,P} = \cos \varphi.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Для наглядности и проверки достоверности теоретических предпосылок согласно уравнениям (2.3) и (2.5 – 2.9) выполнен практический расчёт кинематических характеристик рабочего органа с правой навивкой при следующих исходных параметрах: $D_{св} = 0,47$ м; $\varepsilon = 15^\circ$; $\omega_{св} = 9,65$ с⁻¹.

Анализ построенных графиков (рисунок 2.3) показал, что рассматриваемая точка M режущей кромки винтовой спирали при поступательном движении агрегата совершает сложное перемещение в пространстве.

В горизонтальной плоскости она перемещается по наклонной прямой линии, а в вертикальной плоскости – по синусоиде.

Благодаря сложной траектории повышается эффективность взаимодействия рабочего органа с почвой.

Витки винтовой спирали (спиральной ленты), погружаясь в почву, помимо рыхления и крошения, одновременно перемещают почвенные частицы относительно друг друга. В результате уменьшается расстояние между ними, следовательно, уменьшается объём пор, что приводит к увеличению плотности прослойки почвы – семенного ложа.

Составляющая скорости V_M^Y , направленная по оси Y является постоянной величиной (рисунок 2.4).

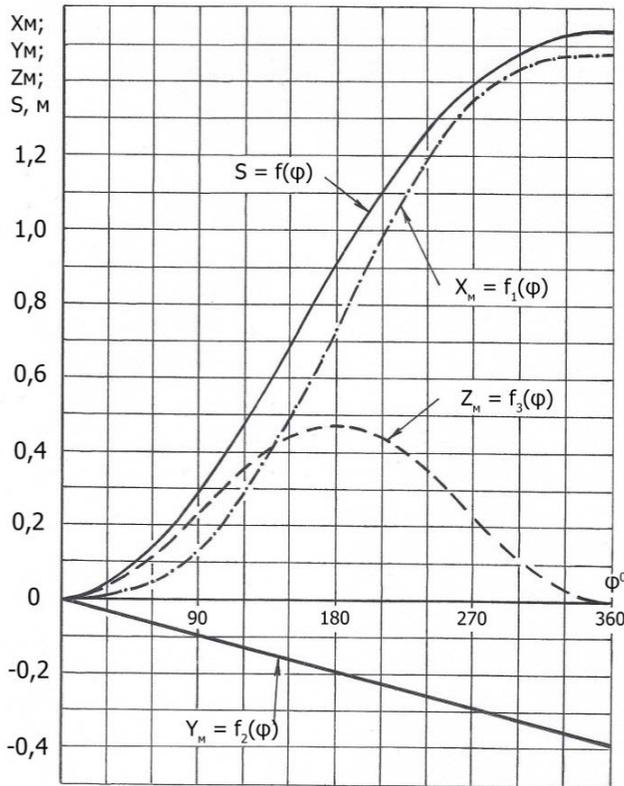


Рисунок 2.3 – Графики изменения перемещения

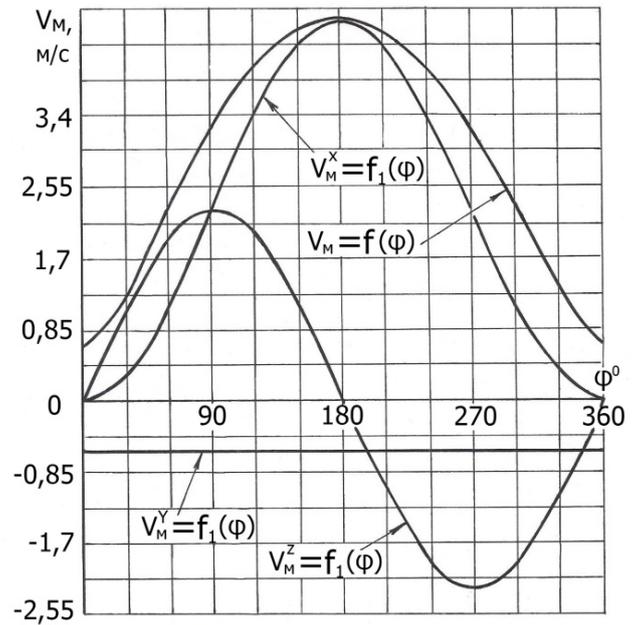


Рисунок 2.4 – Графики изменения скорости

Составляющие же скорости V_M^X и V_M^Z исследуемой точки, направленные по осям X и Z соответственно в течение периода, т. е. одного оборота винтовой спирали являются переменными параметрами, а это способствует к активному разрушению комков, следовательно, эффективному прикатыванию почвы. При углах поворота рабочего органа, равных 0° (360°) и 180° составляющая $V_M^Z = 0$.

Составляющие ускорения точки в различных плоскостях различны (рисунок 2.5). Составляющая ускорения a_M^Z , направленная по оси Z изменяется по косинусоидальному закону, а составляющая ускорения a_M^X , направленная по оси X , наоборот, – по синусоидальному закону.

При углах поворота рабочего органа, равных 0° (360°) и 180° составляющая ускорения $a_M^X = 0$. Когда же углы поворота рабочего органа равны 90° и 270° , составляющая ускорения, направленная по оси Z , т. е. $a_M^Z = 0$.

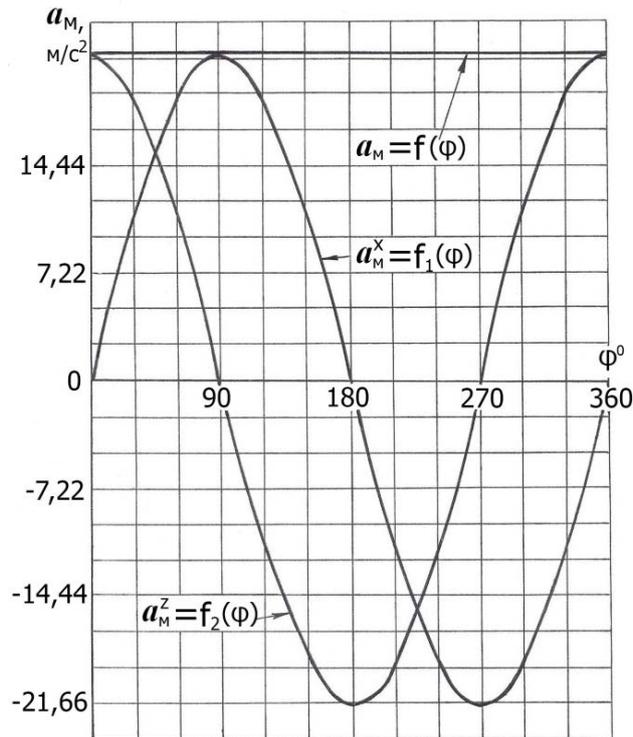


Рисунок 2.5 – Графики изменения ускорения

Величина абсолютного ускорения a_M исследуемой точки винтовой спирали является постоянной величиной.

2.2.2 Определение и обоснование диаметра спирально - винтового рабочего органа

Основным параметром, определяющим работоспособность почвообрабатывающего орудия и влияющих на энергетические показатели, является диаметр спирально-винтового рабочего органа.

В стадии проектирования почвообрабатывающих орудий диаметр ротационных рабочих органов определяют различными способами [111]. Например, значение диаметра традиционно связывают с глубиной обработки почвы по следующей эмпирической зависимости [110]:

$$D = k a, \quad (2.12)$$

где k – коэффициент, равный для дисковых плугов 3 – 3,5; для луцильников 5 – 6; для дисковых борон 4 – 6; a – глубина обработки почвы, м.

Диаметр ротационных рабочих органов определяют также исходя из максимального размера разрушаемых почвенных комков. При этом должно быть обеспечено защемление почвенных комков режущими кромками рабочих органов. Аналитически это условие записывается таким образом:

$$D = 2p / [1 - \cos(\varphi_{\text{вн}} + \varphi_{\text{тр}})], \quad (2.13)$$

где p – максимальный размер разрушаемых почвенных комков, м; $\varphi_{\text{вн}}$ – угол внутреннего трения почвы, градус; $\varphi_{\text{тр}}$ – угол трения почвы о материал рабочего органа, градус.

Однако спирально-винтовые рабочие органы относятся к нетрадиционным рабочим органам [42, 47], поскольку отличаются от других конструкций наличием не только кривизны, но и кручения своих режущих элементов (рисунок 2.6).

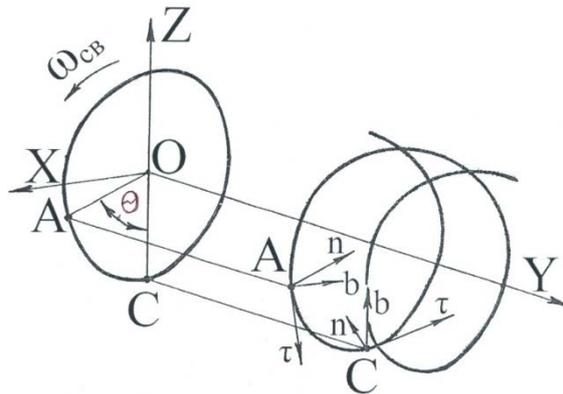


Рисунок 2.6 – Геометрические характеристики спирали

Каждая точка режущей кромки винтовой спирали характеризуется главной нормалью n , которая направлена к центру круга кривизны, касательной τ , которая перпендикулярна к главной нормали, а также бинормалью b , т. е. нормалью, перпендикулярной к соприкасающейся плоскости. Соприкасающейся плоскостью называется плоскость, которая проходит через касательную и главную нормаль. Что характерно, вектор главной нормали n образует с осью OY постоянный угол во всех точках режущей кромки, равный углу ε наклона витка спирали. В то же время он периодически меняет своё направление через угол θ закручивания спирали, равный 45 градусам.

Исследованиями Ермолко Е.В. [31] установлено, что максимальная глубина обработки почвы, обеспечивающая в ходе предпосевной обработки почвы стабильную работу орудия, будет ограничиваться дугой режущей кромки спирали, внедрённой в почву, которая стягивается углом 2θ , т. е. 90 градусов.

Рассматривая винтовую спираль в рабочем положении (рисунок 2.7), имеем:

$$OB = OC - BC = D_{CB} / 2 - a, \quad (2.14)$$

где a – глубина обработки почвы, м.

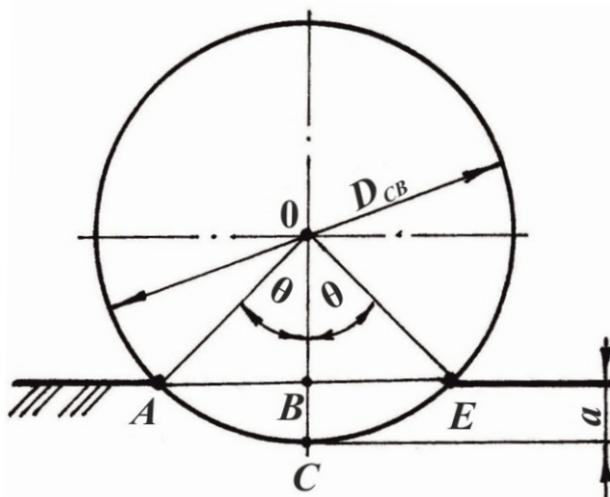


Рисунок 2.7 – К обоснованию диаметра рабочего органа

С другой стороны,

$$OB = OE \cos \theta = D_{CB} \cos \theta / 2. \quad (2.15)$$

Приравнивая правые части выражений (2.14) и (2.15), получим:

$$D_{CB} / 2 - a = D_{CB} \cos \theta / 2. \quad (2.16)$$

Отсюда можно найти выражение для определения диаметра рабочего органа, которое имеет вид:

$$D_{CB} = 2 a / (1 - \cos \theta). \quad (2.17)$$

С учётом того, что $\cos \theta = \cos 45^\circ = 0,707$, зависимость (2.17) принимает следующий вид:

$$D_{CB} = 6,8 a. \quad (2.18)$$

Если взять глубину обработки почвы $a = 0,06 \dots 0,08$ м, то в соответствии с выражением (2.18) имеем: $D_{CB} = 0,408 \dots 0,544$ м. При проектировании ротационно-

го почвообрабатывающего орудия за основу принято среднее значение диаметра спирально-винтового рабочего органа, т. е. $D_{\text{СВ}} = 0,47$ м.

2.2.3 Определение и обоснование угла наклона образующей поверхности винтовой спирали (образующей геликоида)

Для снижения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия образующая поверхности винтовой спирали, т. е. образующая геликоида наклонена к поверхности почвы под углом δ (рисунок 2.8). Напомним, что в переводе с греческого геликоид означает один из видов винтовой поверхности (*helix* – спираль, *eidos* – вид).

Виток спирали, выполненный в виде наклонного геликоида, вертикально заходит в почву. Усилие при этом равно по модулю $P_{\text{СВ}}$, а реакция почвы на поверхность геликоида – $R_{\text{СВ}}$. (рисунок 2.8).

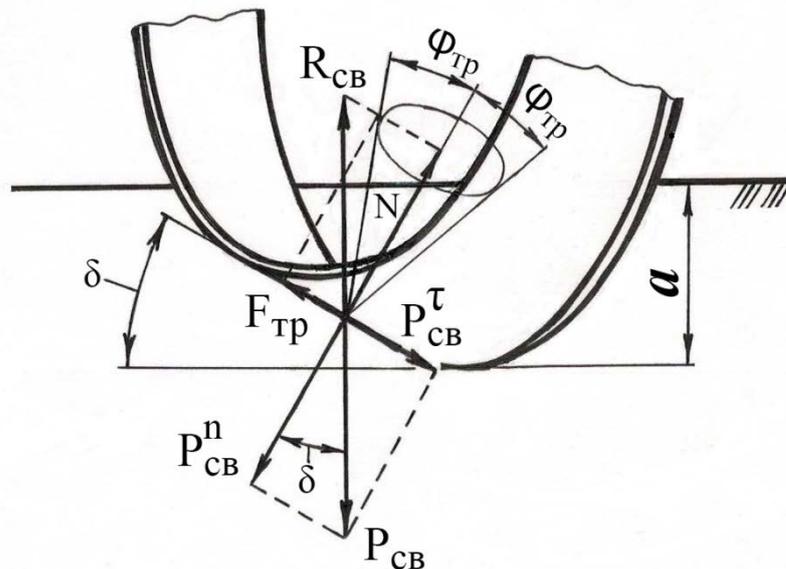


Рисунок 2.8 – Схема к обоснованию угла наклона образующей геликоида

Исследованиями проф. Канарёва Ф.М. [36] установлено, что скользящее вхождение любого ротационного рабочего органа в почву обеспечивается лишь в том случае, когда фронтальная реакция выходит за пределы угла трения.

Скользящее внедрение косо́го геликоида в почву возможно при соблюдении неравенства:

$$P_{\text{св}}^{\tau} > F_{\text{тр}} \quad \text{или} \quad P_{\text{св}} \sin \delta > F_{\text{тр}}, \quad (2.19)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения почвы о поверхность.

Только при соблюдении условия (2.19) составляющая ($P_{\text{св}} \sin \delta - F_{\text{тр}}$) передаётся почве и сообщает её частицам ускоренное относительное движение (скольжение).

Силу трения скольжения можно определить по известной формуле:

$$F_{\text{тр}} = N \operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}}, \quad (2.20)$$

где N – нормальная реакция почвы; $\varphi_{\text{тр}}$ – угол трения скольжения почвы о рабочую поверхность геликоида.

В свою очередь N определяется из выражения:

$$N = P_{\text{св}}^n = P_{\text{св}} \cos \delta. \quad (2.21)$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$F_{\text{тр}} = P_{\text{св}} \cos \delta \operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.22)$$

Подставив в формулу (2.19) значения силы трения из выражения (2.22), получим следующее неравенство:

$$P_{\text{св}} \sin \delta > P_{\text{св}} \cos \delta \operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}}.$$

После преобразований данного неравенства и определённых сокращений, имеем:

$$\operatorname{tg} \delta > \operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}} \quad \text{или} \quad \delta > \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.23)$$

Угол трения скольжения связных песчаных и супесчаных почв о стальную поверхность рабочих органов равен $25^{\circ} - 35^{\circ}$, чернозёма – $24^{\circ} - 39^{\circ}$, среднесуглинистых почв – $19^{\circ} - 26^{\circ}$ [98, 110].

Из выражения (2.23) с учётом значений угла трения скольжения различных типов почвы вытекает, что рациональное значение угла наклона образующего геликоида в почву должно соответствовать условию: $\delta > 19^{\circ} - 39^{\circ}$.

При проектировании ротационного почвообрабатывающего орудия за основу принят угол $\delta = 30^{\circ}$.

2.2.4 Определение и обоснование угла наклона витка спирально - винтового рабочего органа

Каждый элемент витка винтовой спирали работает как непрерывно действующий трёхгранный клин [10, 42]. В ходе технологического процесса режущие кромки винтовой спирали разрезают почву (монолит), а рабочие их поверхности (поверхности геликоидов) производят сжатие и сдвиг почвы.

На практике витки наклонного геликоида изготавливаются из диска, выполненного в виде усечённого кругового конуса. Аналитический расчёт развёртки одного витка наклонного геликоида выполняется по известной методике [103].

Вместе с тем, геометрия винтовой линии такова, что образующие цилиндра по всему периметру пересекают её под одинаковым углом γ (см. рисунок 2.2).

В связи с этим угол ε наклона витка винтовой спирали является постоянной величиной во всех её точках (рисунок 2.9).

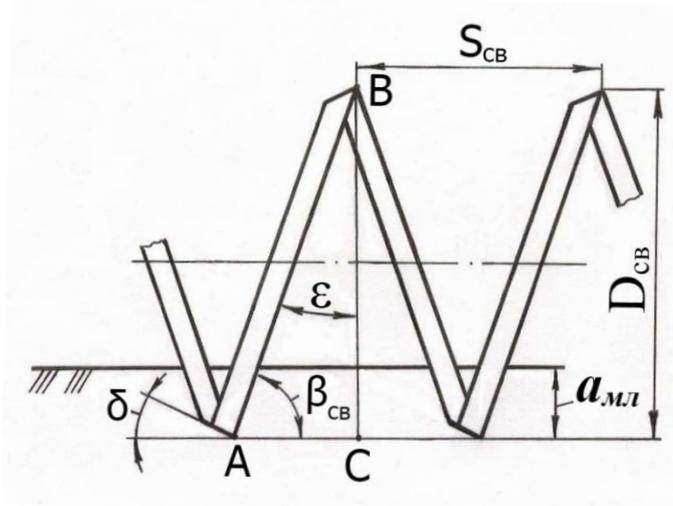


Рисунок 2.9 – Схема к определению угла наклона витка спирали

В теории винтовых пружин угол наклона витка называют углом подъёма винтовой линии [125]. В общем случае, т. е. когда значения конструктивных параметров известны (заданы), угол наклона витка винтовой спирали вычисляется согласно формуле [47]:

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} [S_{CB} / (\pi D_{CB})], \quad (2.24)$$

где S_{CB} , D_{CB} – шаг и диаметр винтовой спирали.

Когда же конструктивные параметры не регламентированы, то рациональное значение угла ε наклона витка винтовой спирали необходимо обосновать аналитическим путём. Для этого нужно сначала определить значение угла $\beta_{\text{св}}$ наклона плоскости режущей кромки спиральной ленты к поверхности почвы. В соответствии с методикой, изложенной в подразделе 2.2.3, условие, обеспечивающее скользящее вхождение плоскости режущей кромки винтовой спирали в почву имеет вид:

$$\beta_{\text{св}} > \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.25)$$

где $\varphi_{\text{тр}}$ – угол трения.

Поскольку угол наклона витка спирали к вертикали равен углу ε наклона витка спирали далее имеем:

$$\beta_{\text{св}} = 90^\circ - \varepsilon. \quad (2.26)$$

Подставляя значение угла $\beta_{\text{св}}$ в неравенство (2.25), получим зависимость для обоснования угла наклона витка спирали, которая имеет вид:

$$\varepsilon < 90^\circ - \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.27)$$

Анализ выражения (2.27) с учётом значений угла трения скольжения различных типов почвы (подраздел 2.2.3), а также практики проектирования прикапывающих спирально-винтовых рабочих органов [31, 66, 124] показал, что рациональное значение угла наклона витка спирали $\varepsilon = 10^\circ - 25^\circ$.

После определения и обоснования диаметра и угла наклона витка винтовой спирали можно определить шаг $S_{\text{св}}$ и общую длину $L_{\text{св}}$ винтовой спирали по соответствующим формулам:

$$S_{\text{св}} = \pi D_{\text{св}} \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (2.28)$$

$$L_{\text{св}} = \pi D_{\text{св}} n_{\text{вит}} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon}, \quad (2.29)$$

где $n_{\text{вит}}$ – количество витков спирали.

В свою очередь, количество витков спирали вычисляется по формуле:

$$n_{\text{вит}} = B / S_{\text{св}}, \quad (2.30)$$

где B – ширина захвата орудия (модуля), м.

При $D_{\text{св}} = 0,47$ м, а также когда $B = 1,8$ м, $\varepsilon = 15^\circ$, получим:

$$S_{CB} = 0,395 \text{ м}; n_{\text{ВИТ}} = 4,55.$$

Для удобства изготовления количество витков спирали округляем до целого числа: $n_{\text{ВИТ}} = 5$. Тогда с учётом конструктивной особенности орудия 2,5 витка спирали необходимо выполнить с правой, а 2,5 витка – с левой навивкой.

Скорректируем теперь шаг и угол наклона витка спирали:

$$S_{CB} = B / n_{\text{ВИТ}} = 1,8 / 5 = 0,36 \text{ м};$$

$$\varepsilon = \arctg [S_{CB} / (\pi D_{CB})] = \arctg [0,36 / (3,14 \cdot 0,47)] = \arctg 0,243935 = 13,7^\circ.$$

Таким образом, общая длина винтовой спирали:

$$L_{CB} = 3,14 \cdot 0,47 \cdot 5 \sqrt{1 + 0,05950} = 7,595 \text{ м}.$$

При проектировании рабочего органа учитывается также количество навивок винтовой спирали.

Для повышения эффективности предпосевной обработки почвы рабочие органы выполняются с количеством навивок $n_{\text{НАВ}} = 2 - 4$ [31].

Витки спирали жёстко закрепляются между собой винтовыми квадратными прутками, обращёнными своими рёбрами к поверхности почвы.

Для обеспечения эффективного крошения почвы и обеспечения прочности конструкции рациональное количество прутков $n_{\text{ПРУТ}} = 4 - 8$, а размеры сечения квадратных прутков 10x10 мм и 12x12 мм [57].

2.2.5 Определение рабочей длины витка винтовой спирали

В процессе предпосевной обработки почвы участвует только часть витка спирали – дуга AE , который разрезает почвенный пласт (см. рисунок 2.7). Дуга AE представляет собой пространственную кривую, дифференциал которой вычисляется согласно уравнению [12, 48, 55]:

$$dl_p = \sqrt{(dX)^2 + (dY)^2 + (dZ)^2}, \quad (2.31)$$

где dX , dY , dZ – дифференциалы дуги винтовой спирали.

Дифференциалы дуги определяются из параметрических уравнений винтовой линии и имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} dX &= \frac{D_{\text{CB}} \cos \theta}{2} d\theta; \\ dY &= \frac{\mp D_{\text{CB}} \operatorname{tg} \varepsilon}{2} d\theta; \\ dZ &= \frac{D_{\text{CB}} \sin \theta}{2} d\theta. \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

Подставляя полученные значения дифференциалов дуги в уравнение (2.31), получим:

$$dl_p = \frac{D_{\text{CB}}}{2} \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta + \operatorname{tg}^2 \varepsilon} d\theta = \frac{D_{\text{CB}}}{2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon} d\theta.$$

Проинтегрировав dl_p по $d\theta$, получим формулу для вычисления рабочей длины витка винтовой спирали:

$$\begin{aligned} l_p &= \frac{D_{\text{CB}}}{2} \int_0^{2\theta = \pi/2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon} d\theta = \frac{D_{\text{CB}}}{2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon} \cdot \theta \Big|_0^{\pi/2} = \\ &= \frac{\pi D_{\text{CB}}}{4} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

При $D_{\text{CB}} = 0,47$ м; $\varepsilon = 13,7^\circ$ длина дуги витка винтовой спирали, которая разрезает пласт составит $l_p = 0,3796$ м.

2.3 Определение и обоснование основных параметров эллипсовидного игольчатого диска ротационного почвообрабатывающего орудия

Ротационные игольчатые рабочие органы, а отдельные исследователи называют их пальцевыми [51, 83], зубовыми [6, 53] или просто ротационными боронами [130], выполняются на практике в виде круглых дисков [43].

Они, как правило, объединяются в секции (батареи) и с учётом технологических требований устанавливаются на раме как фронтально (горизонтально), так и афронтально (с углом атаки).

В случае применения игольчатых рабочих органов в качестве адаптера они устанавливаются на раме афронтально и с углом наклона к вертикали одновременно [104, 107].

Работают игольчатые рабочие органы в пассивном и активном режимах. Одним из перспективных направлений снижения энергозатрат на выполнение технологических операций является применение ротационных игольчатых орудий с активным приводом [49, 113].

Эллипсоидные игольчатые диски, входящие в состав предлагаемого ротационного почвообрабатывающего орудия объединены в секцию и установлены внутри спирально-винтового рабочего органа коаксиально и приводятся в движение при помощи активного привода. Благодаря конструктивной особенности дисков почва деформируется здесь не только прокалыванием и растяжением [44, 70], но и растаскиванием [4].

К конструктивным и технологическим параметрам относятся диаметр $D_{иг}$ эллипсоидного игольчатого диска; диаметр d иглы; глубина $a_{мл}$ обработки (мульчирования) почвы; скорость $V_{e(иг)}$ поступательного движения; угловая скорость $\omega_{иг}$ вращения диска; показатель λ кинематического режима работы; количество $k_{игл}$ игл на диске; угол α наклона ступицы диска к оси вращения; угол β установки игл на ступице диска по периметру диска; длина игл $l_{игл}$ по периметру диска; угол j наклона игл к оси вращения; угол j_p начала резания почвы режущими кромками игл; количество $k_д$ эллипсоидных дисков в секции; угол $\beta_{иг}$ расстановки дисков; амплитуда A движения конечных точек иглы; шаг l_d расстановки дисков на валу секции.

2.3.1 Параметрические уравнения движения игольчатого диска в пространстве

Параметры игольчатого диска ротационного орудия (рисунок 2.10) определяются согласно формулам:

$$a = D_{иг} / (2 \sin \alpha); \quad b = D_{иг} / 2, \quad (2.34)$$

где a , b – большая и малая полуоси эллипса; $D_{иг}$ – диаметр игольчатого диска; α – угол наклона большой оси эллипса (ступицы диска) к оси вращения.

С другой стороны, из выражения (2.34) вытекает, что при заданных значениях конструктивных параметров можно вычислить значение угла наклона ступицы диска к оси вращения согласно зависимости:

$$\alpha = \arcsin (b / a). \quad (2.35)$$

Однако с технологической точки зрения, значение данного параметра должно быть не произвольным, а рациональным, т. е. при проектировании ротационного орудия сначала обосновываются значения диаметра $D_{иг}$ игольчатого диска и угла α наклона ступицы к оси вращения, а потом вычисляются параметры самого диска согласно выражению (2.34).

Обоснование рациональных значений диаметра и угла наклона ступицы диска будет рассмотрено далее в соответствующих подразделах 2.3.2 и 2.3.4 настоящей работы.

Соблюдая условие (2.35) мы обеспечиваем устойчивую работу ротационного орудия, т. к. в рабочем положении получаем тот же «круглый» игольчатый диск, но совершающий в пространстве сложное перемещение.

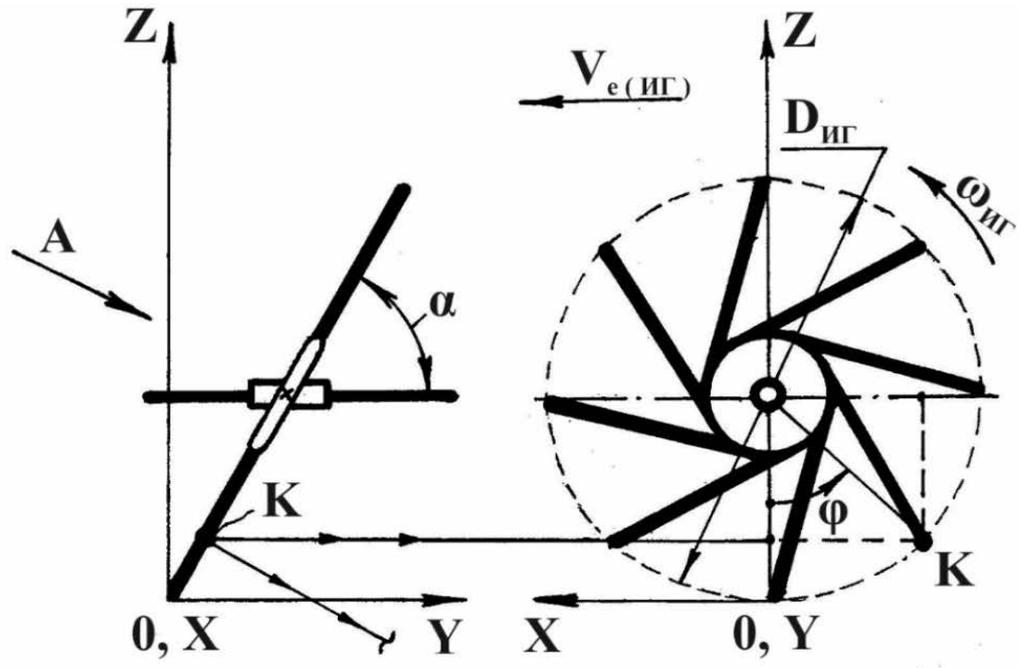
Анализ взаимодействия предлагаемого ротационного почвообрабатывающего орудия с почвой невозможно без рассмотрения кинематики эллипсоидного игольчатого диска в пространстве [46, 128].

При рассмотрении кинематики ротационных почвообрабатывающих рабочих органов, как было подчёркнуто в подразделе 2.1.1, определяются в первую очередь поступательные скорости исследуемых точек, а затем методом аналитической геометрии вычисляются их координаты в пространственной прямоугольной системе координат и составляются соответствующие параметрические уравнения движения.

Пусть эллипсоидный игольчатый диск с диаметром $D_{иг}$ вращается вокруг оси вала «сверху вниз» (против часовой стрелки) с постоянной угловой скоростью $\omega_{иг}$ и одновременно перемещается поступательно по поверхности поля с постоянной скоростью $V_{e(иг)}$ (рисунок 2.10).

Поступательную скорость $V_{e(иг)}$ исследуемой точки K рассматриваемой иглы, которая удалена от оси вращения на максимальном расстоянии целесообразнее выразить через её окружную скорость $V_{o(иг)}$ и показатель кинематического режима (скоростной параметр) λ , вычисляемый по известной формуле [60]:

$$\lambda = V_{o(иг)} / V_{e(иг)}. \quad (2.36)$$



A

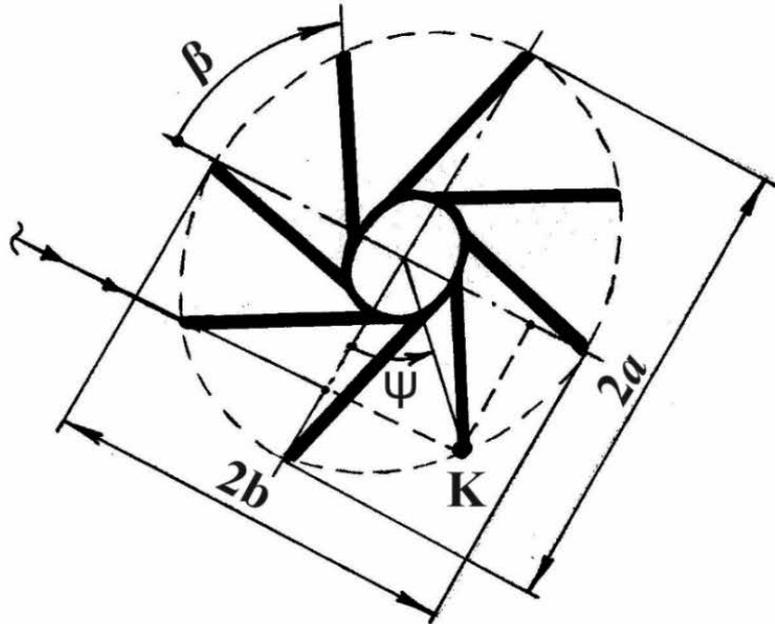


Рисунок 2.10 – Схема к исследованию кинематики эллипсовидного игольчатого диска

Следовательно, выражение для определения поступательной скорости конечной точки K иглы эллипсовидного диска имеет следующий вид:

$$V_{e(\text{иг})} = V_{o(\text{иг})} / \lambda = \omega_{\text{иг}} D_{\text{иг}} / (2 \lambda). \quad (2.37)$$

Время движения данной точки иглы определяется по формуле: $t_k = \varphi / \omega_{\text{иг}}$, где φ – текущее значение углового перемещения точки (угол поворота игольчатого диска), радиан.

Параметрические уравнения движения конечной точки K иглы диска в пространственной прямоугольной системе координат $OXYZ$ имеют следующий вид, причём верхний знак для диска, вращающегося «сверху вниз», а нижний знак – «снизу вверх»:

$$\left. \begin{aligned} X_k &= V_{e(\text{иг})} t_k \mp D_{\text{иг}} \sin \varphi / 2 = D_{\text{иг}} (\varphi / \lambda \mp \sin \varphi) / 2; \\ Y_k &= D_{\text{иг}} (1 - \cos \varphi) / (2 \operatorname{tg} \alpha); \\ Z_k &= D_{\text{иг}} (1 - \cos \varphi) / 2, \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

где φ – текущее значение углового перемещения конечной точки иглы (угол поворота эллипсовидного игольчатого диска), радиан; α – угол наклона ступицы диска к оси вращения, градус.

Абсолютное движение точки K в пространстве определяется из уравнения:

$$\begin{aligned} S_k &= \sqrt{(X_k)^2 + (Y_k)^2 + (Z_k)^2} = \\ &= D_{\text{иг}} \sqrt{(\varphi / \lambda \mp \sin \varphi)^2 + (1 - \cos \varphi)^2 (1 + 1 / \operatorname{tg}^2 \alpha)} / 2. \end{aligned} \quad (2.39)$$

При определении отдельных конструктивных параметров сталкиваемся с так называемым полярным радиусом эллипсовидного диска, который вычисляется из канонического уравнением эллипса, имеющего следующий вид:

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1. \quad (2.40)$$

С учётом значения полуосей a и b эллипса (см. выражение 2.34) получим формулу для вычисления полярного радиуса, которая имеет следующий окончательный вид:

$$\rho = D_{\text{иг}} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi + (\sin \alpha \cos \psi)^2}). \quad (2.41)$$

По величине и направлению скорости и ускорения исследуемой точки иглы можно судить об интенсивности воздействия игольчатого диска на почву.

Проекции скорости исследуемой точки иглы можно вычислить путём дифференцирования выражения (2.38) по времени:

$$\left. \begin{aligned} V_K^X &= dX_K/dt = \omega_{иг} D_{иг} (1/\lambda \bar{\Gamma} \cos \varphi) / 2, \\ V_K^Y &= dY_K/dt = \omega_{иг} D_{иг} \sin \varphi / (2 \operatorname{tg} \alpha), \\ V_K^Z &= dZ_K/dt = \omega_{иг} D_{иг} \sin \varphi / 2. \end{aligned} \right\} (2.42)$$

Модуль абсолютной скорости (скорости резания) точки иглы определяется из выражения:

$$\begin{aligned} V_K &= \sqrt{(V_K^X)^2 + (V_K^Y)^2 + (V_K^Z)^2} = \\ &= \omega_{иг} D_{иг} \sqrt{(1/\lambda \bar{\Gamma} \cos \varphi)^2 + \sin^2 \varphi (1/\operatorname{tg}^2 \alpha + 1)} / 2. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Дифференцировав выражение (2.42) по времени, можно определить проекции ускорения точки K :

$$\left. \begin{aligned} a_K^X &= dV_K^X/dt = \pm \omega_{иг}^2 D_{иг} \sin \varphi / 2, \\ a_K^Y &= dV_K^Y/dt = \omega_{иг}^2 D_{иг} \cos \varphi / (2 \operatorname{tg} \alpha), \\ a_K^Z &= dV_K^Z/dt = \omega_{иг}^2 D_{иг} \cos \varphi / 2. \end{aligned} \right\} (2.44)$$

Следовательно, формула для определения модуля абсолютного ускорения исследуемой точки иглы имеет вид:

$$a_K = \sqrt{(a_K^X)^2 + (a_K^Y)^2 + (a_K^Z)^2} = \omega_{иг}^2 D_{иг} \sqrt{1 + (\cos \varphi / \operatorname{tg} \alpha)^2} / 2. \quad (2.45)$$

Направление векторов скорости и ускорения точки рассматриваемой иглы диска в пространстве определяют так называемые направляющие косинусы, которые вычисляются по выражениям соответственно:

$$\left. \begin{aligned} K_X^{V_K} &= V_K^X / V_K = \\ &= (1/\lambda \bar{\Gamma} \cos \varphi) / \sqrt{(1/\lambda \bar{\Gamma} \cos \varphi)^2 + \sin^2 \varphi (1/\operatorname{tg}^2 \alpha + 1)}, \\ K_Y^{V_K} &= V_K^Y / V_K = \\ &= (\sin \varphi / \operatorname{tg} \alpha) / \sqrt{(1/\lambda \bar{\Gamma} \cos \varphi)^2 + \sin^2 \varphi (1/\operatorname{tg}^2 \alpha + 1)}, \\ K_Z^{V_K} &= V_K^Z / V_K = \\ &= \sin \varphi / \sqrt{(1/\lambda \bar{\Gamma} \cos \varphi)^2 + \sin^2 \varphi (1/\operatorname{tg}^2 \alpha + 1)}. \end{aligned} \right\} (2.46)$$

$$\left. \begin{aligned} K_X^{a_K} &= a_K^X / a_K = \pm \sin \varphi / \sqrt{1 + (\cos \varphi / \operatorname{tg} \alpha)^2}, \\ K_Y^{a_K} &= a_K^Y / a_K = (\cos \varphi / \operatorname{tg} \alpha) / \sqrt{1 + (\cos \varphi / \operatorname{tg} \alpha)^2}, \\ K_Z^{a_K} &= a_K^Z / a_K = \cos \varphi / \sqrt{1 + (\cos \varphi / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \end{aligned} \right\} (2.47)$$

Как показывает практический расчёт, выполненный по полученным уравнениям при исходных данных: $D_{иг} = 0,4$ м, $\alpha = 65^\circ$; $\lambda = 2$; $\omega_{иг} = 22,7$ с⁻¹, конечные точки игл эллипсовидного диска при поступательном движении агрегата перемещаются в горизонтальной и вертикальной плоскостях по синусоидальной траектории (рисунок 2.11).

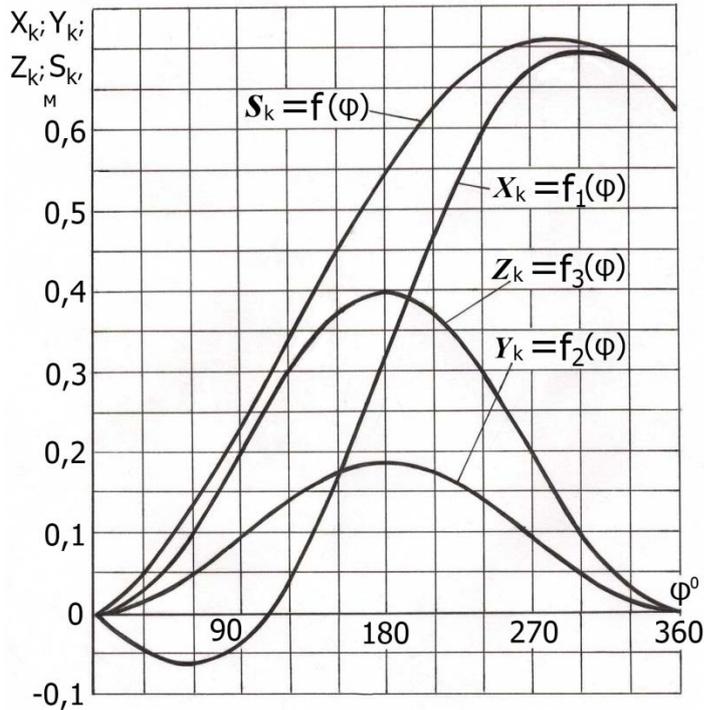


Рисунок 2.11 – Графики перемещения конечной точки игл

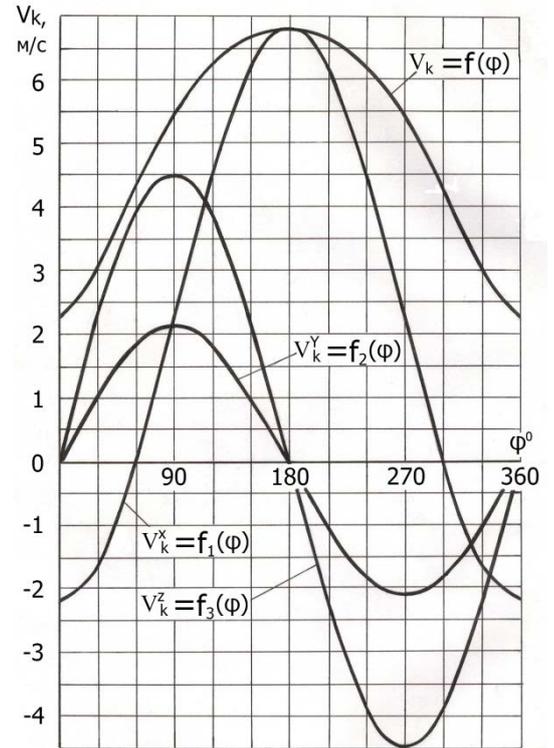


Рисунок 2.12 – Графики скорости конечной точки игл

Качество предпосевной обработки почвы зависит от траектории движения диска, его диаметра $D_{иг}$ и угла α наклона ступицы диска к оси вращения и показателя кинематического режима λ .

Составляющие же скорости V_k^Y и V_k^Z исследуемой точки, направленные по осям Y и Z соответственно в течение периода являются переменными параметрами и изменяются по синусоидальному закону (рисунок 2.12). При угле поворота диска, равном 180° , они равны нулю.

Скорость V_k^X точки, направленная по оси X , является также переменной величиной, но в течение периода изменяется по косинусоидальному закону.

Составляющие ускорения a_k^Y, a_k^Z , которые направлены по осям Y и Z (рисунок 2.13), изменяются по косинусоидальному закону, при углах поворота диска, равных 90° и 270° , они равны нулю.

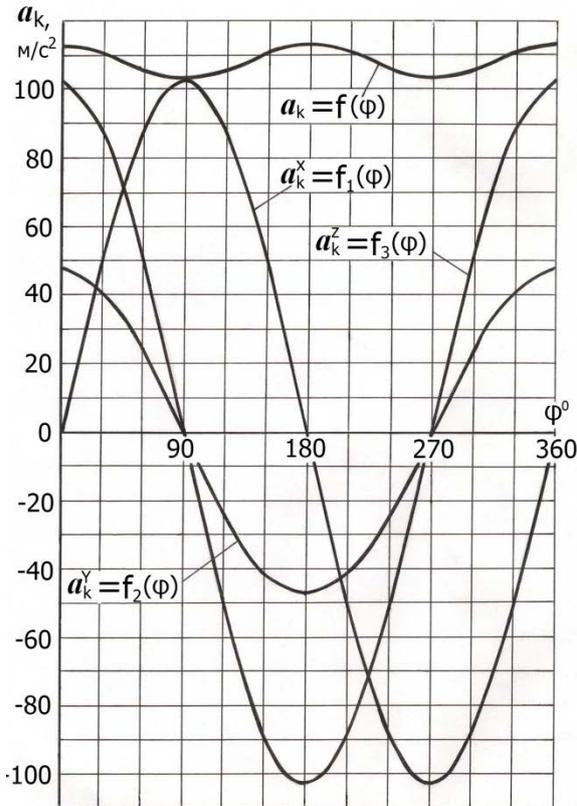


Рисунок 2.13 – Графики ускорения конечной точки игл

Составляющая ускорения a_M^X , направленная по оси X , наоборот, изменяется по синусоидальному закону, при углах поворота диска, равных 0° (360°) и 180° , она равна нулю. Абсолютное ускорение a_k конечной точки иглы диска, в отличие от абсолютного ускорения точки режущей кромки спирально-винтового рабочего органа, является переменной величиной и изменяется в течение одного оборота диска по косинусоидальному закону. Оно достигает своего максимума дважды при углах поворота диска, равных 0° (360°) и 180° градусов, что способствует интенсификации крошения почвенных комков.

Для выявления влияния показателя кинематического режима на величину абсолютной скорости конечных точек игл, т. е. скорости резания почвы, построены дополнительные графики зависимости $V_k / V_{0(иг)} = f(\varphi)$ (рисунок 2.14). С уве-

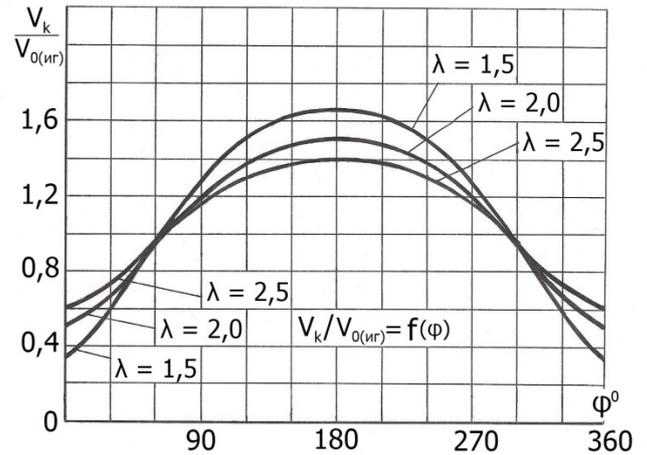


Рисунок 2.14 – Графики зависимости скорости резания от показателя кинематического режима

личением показателя кинематического режима λ скорости резания почвы уменьшаются, что согласуется с исследованиями других авторов [55].

2.3.2 Обоснование диаметра эллипсовидного игольчатого диска

В ротационном почвообрабатывающем орудии эллипсовидные игольчатые диски коаксиально установлены внутри спирально-винтового рабочего органа (рисунок 2.15). Поэтому их диаметры должны быть строго согласованы между собой.

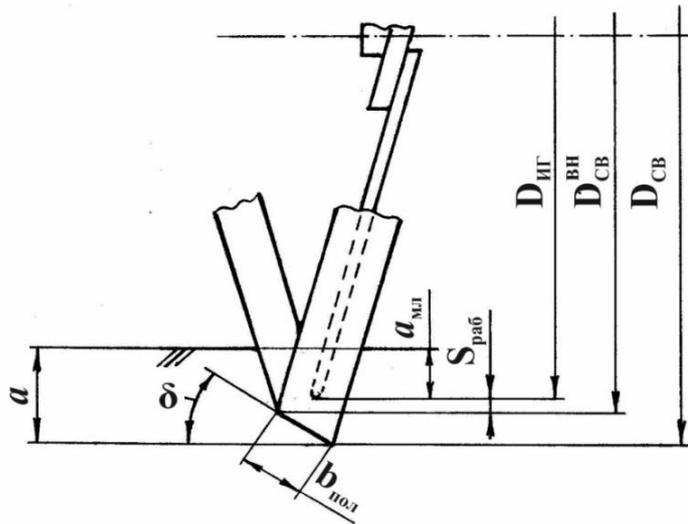


Рисунок 2.15 – Схема к обоснованию диаметра игольчатого диска

С учётом технологических требований на мульчирование поверхностного слоя почвы значение диаметра $D_{иг}$ эллипсовидного игольчатого диска назначается согласно зависимости [14]:

$$D_{иг} = D_{св} - a, \quad (2.48)$$

где $D_{св}$ – диаметр спирально-винтового рабочего органа, м; a – глубина обработки почвы, м.

При $D_{св} = 0,47$ м, $a = 0,06 - 0,08$ м из выражения (2.48) вытекает, что $D_{иг} = 0,390 - 0,410$ м. При проектировании ротационного почвообрабатывающего орудия за основу принято среднее значение диаметра $D_{иг} = 0,4$ м.

В то же время, при проектировочных расчётах необходимо исключить задевание игл эллипсовидных дисков о внутреннюю кромку винтовой спирали. Это обеспечивается соответствующим подбором значений ширины $b_{пол}$ ленты спира-

ли (величины образующей геликоида) при заданном значении угла δ наклона. Значение угла δ было обосновано в подразделе 2.2.3 настоящей работы: $\delta = 30^\circ$.

Внутренний диаметр винтовой спирали можно рассчитать по формуле:

$$D_{\text{СВ}}^{\text{ВН}} = D_{\text{СВ}} - 2 b_{\text{пол}} \sin \delta. \quad (2.49)$$

Следовательно, при принятом значении $b_{\text{пол}} = 0,04$ м внутренний диаметр винтовой спирали $D_{\text{СВ}}^{\text{ВН}} = 0,43$ м.

Тогда зазор между концами игл диска и внутренней кромкой винтовой спирали $S_{\text{раб}} = (D_{\text{СВ}}^{\text{ВН}} - D_{\text{иг}}) / 2 = 0,015$ м.

При известных значениях глубины обработки почвы, глубины мульчирования поверхности и угла наклона образующей рабочей поверхности спирали можно определить значение ширины ленты спирали согласно неравенству:

$$(a - a_{\text{мл}}) > b_{\text{пол}} \sin \delta.$$

Следовательно,

$$b_{\text{пол}} < (a - a_{\text{мл}}) / \sin \delta. \quad (2.50)$$

Таким образом, при известных численных значениях параметров, входящих в выражение (2.50), ширина витка винтовой спирали должна соответствовать следующему условию: $b_{\text{пол}} < 0,08$ м.

2.3.3 Определение и обоснование показателя кинематического режима работы эллипсовидного игольчатого диска

Технологические параметры активных ротационных рабочих органов, следовательно, качество обработки почвы зависят главным образом от показателя кинематического режима, т. е. скоростного параметра.

Как известно [36, 46], при показателе кинематического режима работы $\lambda = 1$ исследуемые точки активных ротационных рабочих органов, в т. ч. конечные точки игл эллипсовидного диска перемещаются в профильной плоскости по обыкновенной циклоиде, когда $\lambda < 1$ – по укороченной циклоиде, когда $\lambda > 1$ – по удлинённой циклоиде, т. е. трохоиде (рисунок 2.16). Следует здесь отметить, когда

$\lambda < 1$ игла работает тыльной стороной, что приводит к увеличению тягового сопротивления агрегата и неудовлетворительной заделке растительных остатков.

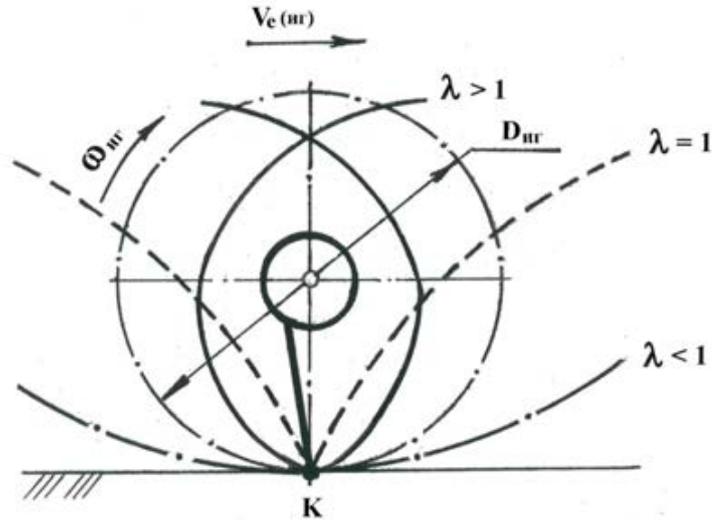


Рисунок 2.16 – Траектории движения конечной точки иглы диска при различных значениях показателя кинематического режима

При $\lambda > 1$ игла отрезает стружку переменного сечения и работает как «двигатель», что улучшает не только заделку растительных остатков, но и уменьшает тяговое сопротивление агрегата [59]. В связи с этим и по сложившейся практике [120] активные ротационные рабочие органы работают в режиме, когда показатель кинематического режима $\lambda > 1$.

При обработке почвы активными ротационными рабочими органами получается неровная подошва, которая характеризуется высотой образуемых гребешков.

Исследованиями проф. Матяшина Ю.И. [55] установлено, что ветви соседних трохойд симметричны и пересекаются посередине их нижними точками (рисунок 2.17). Расстояние между этими точками равно подаче S на одну иглу. Следовательно, перемещение X_K точки равно длине отрезка, равной $S / 2$:

$$X_K = D_{иг} (\varphi / \lambda \mp \sin \varphi) / 2 = S / 2. \quad (2.51)$$

В свою очередь, подача на одну иглу определяется по выражению:

$$S = \pi D_{иг} / (\lambda k_{игл}), \quad (2.52)$$

где $k_{игл}$ – количество игл на диске, шт.

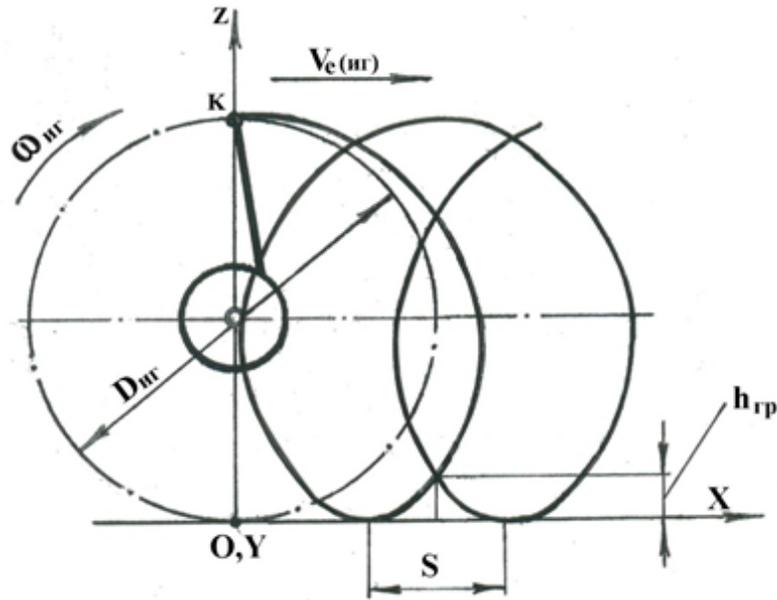


Рисунок 2.17 – К обоснованию показателя кинематического режима

Выражение (2.52) показывает, что подачу на иглу можно изменять путём варьирования значений диаметра диска, показателя кинематического режима и количества игл на диске.

Подставляя в уравнение (2.51) значения подачи и после некоторых преобразований, получаем:

$$\pi / k_{\text{игл}} = \lambda \sin \varphi \mp \varphi. \quad (2.53)$$

Высота $h_{\text{гр}}$ гребешков равна аппликате Z_K данной точки:

$$Z_K = D_{\text{игл}} (1 - \cos \varphi) / 2 = h_{\text{гр}}. \quad (2.54)$$

Угол φ определяют на практике графическим способом, затем по уравнению (2.54) вычисляют высоту гребешков. Высота гребешков уменьшается с увеличением показателя кинематического режима и количества игл на диске.

С другой стороны, высота гребешков задаётся агротехническими требованиями на выполнение конкретной технологической операции, т. е. в расчётах она считается заданной.

В этом случае задача сводится к определению показателя кинематического режима работы при различных значениях количества игл на диске. Из выражения (2.53) имеем:

$$\lambda = (\pi / k_{\text{игл}} \pm \varphi) / \sin \varphi. \quad (2.55)$$

Видим, что для определения искомого параметра необходимо сначала найти угол φ в радианах. Из формулы (2.54) имеем:

$$\cos \varphi = 1 - 2 h_{\text{гр}} / D_{\text{иг}}. \quad (2.56)$$

Следовательно,

$$\varphi = \arccos (1 - 2 h_{\text{гр}} / D_{\text{иг}}). \quad (2.57)$$

Используя формулу для преобразования тригонометрических функций, находим зависимость для вычисления $\sin \varphi$:

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 2 \sqrt{h_{\text{гр}} (D_{\text{иг}} - h_{\text{гр}})} / D_{\text{иг}}. \quad (2.58)$$

Таким образом, после подстановки найденных значений φ и $\sin \varphi$ в формулу (2.55), получим окончательное выражение для определения показателя кинематического режима:

$$\lambda = [\pi / k_{\text{игл}} \pm \arccos (1 - 2 h_{\text{гр}} / D_{\text{иг}})] / [2 \sqrt{h_{\text{гр}} (D_{\text{иг}} - h_{\text{гр}})} / D_{\text{иг}}]. \quad (2.59)$$

Допустимое значение гребнистости, т. е. высоты гребешков подсчитывается из соотношения [55]:

$$h_{\text{гр}} = (0,1 - 0,2) a_{\text{мл}}, \quad (2.60)$$

где $a_{\text{мл}}$ – глубина обработки (мульчирования), м.

В соответствии с агротехническими требованиями $a_{\text{мл}} = (0,03 - 0,04)$ м. Следовательно, $h_{\text{гр}} = (0,003 - 0,008)$ м.

Расчёты, проведённые при $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $h_{\text{гр}} = 0,004$ м и $k_{\text{игл}} = 10$ показали, что показатель кинематического режима при вращении диска «сверху вниз» равен 2,58; а «снизу вверх» – 1,57. Если взять $k_{\text{игл}} = 12$, то данный параметр равен соответственно 2,32 и 0,31.

Дальнейший анализ и расчёты показали, что для повышения эффективности технологического процесса количество игл на диске нужно увеличивать до 16 шт. Тогда в соответствии с уравнением (2.56) значение показателя кинематического режима:

$$\lambda = [3,14 / 16 + \arccos (1 - 2 \cdot 0,004 / 0,4)] / [2 \sqrt{0,004 (0,4 - 0,004)} / 0,4] = 2. \quad (2.61)$$

При рациональных значениях диаметра диска $D_{иг} = 0,4$ м и показателя кинематического режима $\lambda = 2$, а также в варианте агрегатирования трактора марки МТЗ-82 с предлагаемым орудием, когда трактор движется, например, с поступательной скоростью $V_{e(иг)} = 8,85$ км /ч = 2,45 м /с можно вычислить угловую скорость вращения диска согласно выражению:

$$\omega_{иг} = 2 V_{e(иг)} \lambda / D_{иг} = 2 \cdot 2,45 \cdot 2 / 0,4 = 24,5 \text{ с}^{-1}.$$

2.3.4 Определение и обоснование угла наклона ступицы эллипсовидного игольчатого диска к оси вращения

Конструктивно иглы эллипсовидного диска закрепляются на ступице, которая, как показывает выражение (2.36), изначально выполнена наклонной, т. е. поверхность ступицы представляет собой эллипс. Следовательно, в стадии проектирования ротационного орудия необходимо сначала обосновать величину угла наклона большой оси эллипса (далее – угол наклона ступицы диска) к оси вращения.

Обоснование наиболее благоприятного значения данного конструктивного параметра производится из условия, обеспечивающего вхождение игл в почву в вертикально-поперечной плоскости со скольжением [35, 39].

В расчётной схеме (рисунок 2.18) рассматриваемая игла наклонена к оси вращения диска под углом $j = \alpha$.

Наши расчёты показали, что данное положение иглы вместе с положением, когда угол $j = (180^\circ - \alpha)$, является с точки зрения вертикального внедрения иглы в почву наиболее неблагоприятным [4].

При исследовании эллипсовидного рабочего органа дискового типа Гайнутдинов Р.Х. [17] также пришёл к такому выводу и выявил, что в указанных положениях для внедрения эллипсовидного диска в почву потребуется максимальное вертикальное усилие.

В соответствии с методикой, изложенной в подразделе 2.2.3, для обеспечения скользящего вхождения рассматриваемой иглы эллипсовидного диска в почву

в вертикально-поперечной плоскости должно быть соблюдено следующее условие:

$$P_{иг} \sin \alpha > P_{иг} \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi_{тр}, \quad (2.62)$$

где $P_{иг}$ – вертикальное усилие; $\varphi_{тр}$ – угол трения о поверхность иглы эллипсоидного диска.

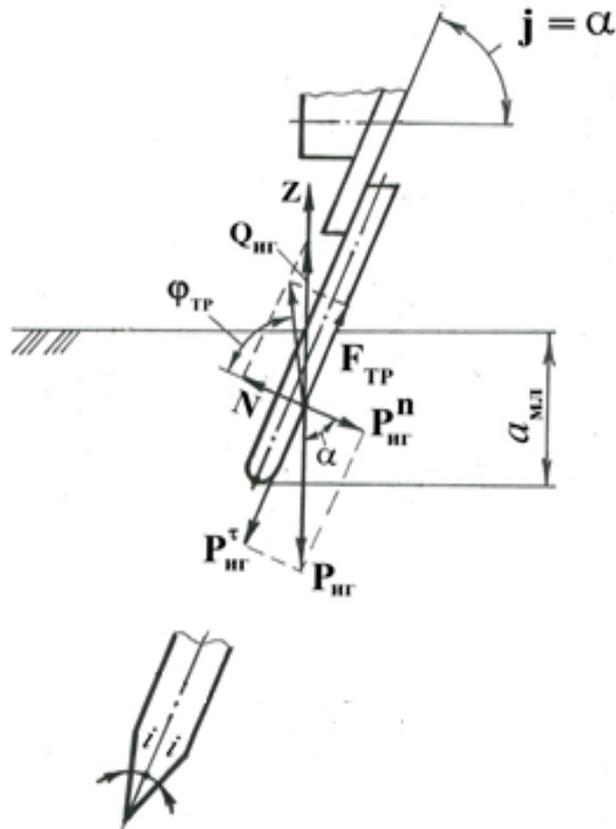


Рисунок 2.18 – Расчётная схема к обоснованию угла наклона ступицы диска к оси вращения

Из неравенства (2.62), после определённых преобразований и сокращений, окончательно имеем:

$$\alpha > \varphi_{тр}. \quad (2.63)$$

В случае, когда концы игл затачиваются с двух сторон под углом i или выполняются в виде конуса с углом при вершине $2i$, выражение для обоснования угла наклона ступицы имеет другой вид:

$$\alpha > \varphi_{тр} + i. \quad (2.64)$$

В ротационных рабочих органах значение угла заточки режущей кромки принимается в пределах $10^\circ - 20^\circ$ [105, 109].

Учитывая значения угла трения характерных для нашего региона почв о стальную поверхность рабочих органов (см. подраздел 2.2.3) и при $i = 20^\circ$, из неравенства (2.64) получаем, что для песчаных почв $\alpha > 45^\circ - 55^\circ$, чернозёма $\alpha > 44^\circ - 59^\circ$, а среднесуглинистых почв $\alpha > 39^\circ - 46^\circ$ [98, 110]. Окончательный анализ показал, что стабильная и устойчивая динамика диска наблюдается, когда угол наклона ступицы эллипсовидного диска к оси вращения $\alpha = 60^\circ - 70^\circ$. Исходя из этого при проектировании орудия был выбран угол $\alpha = 65^\circ$.

2.3.5 Определение количества игл на эллипсовидном диске

Количество игл, устанавливаемых на ступице эллипсовидного диска, определяется исходя из подачи на одну иглу и гребнистости подошвы, которые, в свою очередь, регламентируются агротехническими требованиями на выполнение соответствующей технологической операции.

В подразделе 2.3.2 было изложено, что допустимая гребнистость, т. е. высота гребешков составляет $0,1 - 0,2$ от заданной глубины мульчирования почвы. В то же время подача на одну иглу не должна превышать $0,1$ м [55].

В общем случае количество игл на диске определяется с учётом обеспечения заданной гребнистости $h_{гр}$ из уравнения (2.59). Оно имеет следующий вид:

$$k_{игл} = \pi D_{иг} / [2 \lambda \sqrt{h_{гр} (D_{иг} - h_{гр})} \mp D_{иг} \arccos (1 - 2h_{гр}/D_{иг})]. \quad (2.65)$$

Выбирая режим вращения диска «сверху вниз», при рациональных исходных параметрах: $D_{иг} = 0,4$ м; $\alpha = 65^\circ$; $\lambda = 2$, а также при $h_{гр} = 0,004$ м определяем количество игл на диске:

$$k_{игл} = 3,14 \cdot 0,4 / [2 \cdot 2 \sqrt{0,004 \cdot (0,4 - 0,004)} - 0,4 \arccos (1 - 2 \cdot 0,004 / 0,4)] = 16.$$

Когда значение показателя λ кинематического режима обосновано изначально, исходя из заданного значения количества игл на диске, данный расчёт выступает как проверочный.

Действительно, при $k_{\text{игл}} = 16$ из выражения 2.59 имеем:

$$\begin{aligned} \lambda &= [\pi / k_{\text{игл}} + \arccos (1 - 2 h_{\text{гр}} / D_{\text{иг}})] / \\ &\quad / (2 \sqrt{h_{\text{гр}} (D_{\text{иг}} - h_{\text{гр}})} / D_{\text{иг}}) = \\ &= [3,14 / 16 + \arccos (1 - 2 \cdot 0,004 / 0,4)] / \\ &\quad / 2 \sqrt{0,004 (0,4 - 0,004)} / 0,4 = 2. \end{aligned} \quad (2.66)$$

Как видим, результаты расчёта совпадают (см. выражения 2.61 и 2.66).

В заключение уточняем подачу на одну иглу:

$$S = \pi D_{\text{иг}} / (\lambda k_{\text{игл}}) = 3,14 \cdot 0,4 / (2 \cdot 16) = 0,0392 \text{ м} < 0,1 \text{ м}.$$

Таким образом, полученное значение подачи на одну иглу удовлетворяет агротехническим требованиям на выполнение предпосевной (поверхностной) обработки почвы.

2.3.6 Определение длины игл эллипсоидного диска по периметру ступицы диска

Длина игл определяется путём фиксирования начальных и конечных их точек соответствующими углами, как на профильной плоскости, так и на плоскости самого диска [4].

Для анализа выбираем иглу, которая занимает произвольное положение (рисунок 2.19).

Угол $\varphi_{\text{игл}}^{\text{H}}$ фиксирования начальной точки T рассматриваемой иглы на профильной плоскости (профильный угловой шаг) определяется по формуле:

$$\varphi_{\text{игл}}^{\text{H}} = 360^\circ / k_{\text{игл}}. \quad (2.67)$$

Истинное значение угла $\psi_{\text{игл}}^{\text{H}}$ фиксирования начальной точки T иглы (рисунок 2.20) зависит от значения профильного углового шага $\varphi_{\text{игл}}^{\text{H}}$, является переменной величиной и вычисляется согласно так называемой формуле перевода угловых параметров из одной координатной системы в другую [18]:

$$\psi_{\text{игл}}^{\text{H}} = \arcsin (\sin \alpha \sin \varphi_{\text{игл}}^{\text{H}} / \sqrt{ \cos^2 \varphi_{\text{игл}}^{\text{H}} + (\sin \alpha \sin \varphi_{\text{игл}}^{\text{H}})^2 }). \quad (2.68)$$

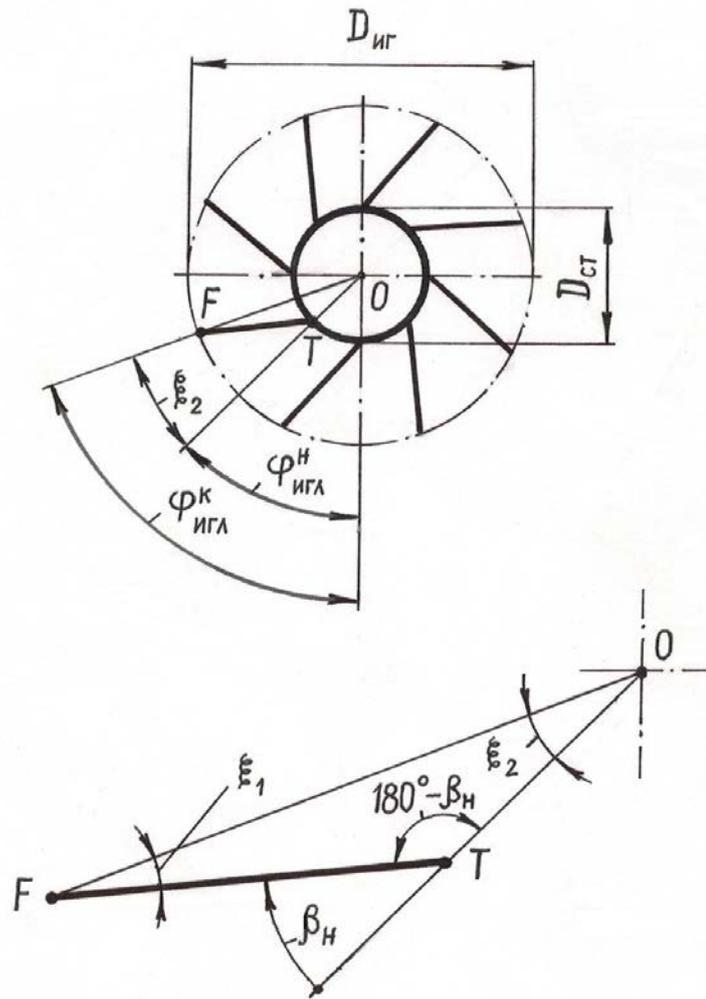


Рисунок 2.19 – Схема к определению длины игл

Угол фиксирования конечной точки F иглы на профильной плоскости можно определить из выражения (рисунок 2.19):

$$\varphi_{\text{игл}}^{\text{к}} = \varphi_{\text{игл}}^{\text{н}} + \xi_2, \quad (2.69)$$

где ξ_2 – угол между радиусом OF диска и радиусом OT ступицы.

Для определения угла ξ_2 сначала нужно определить угол ξ_1 между радиусом OF диска и профильной проекцией иглы FT .

На основании теоремы синусов из треугольника OFT имеем:

$$0,5 D_{\text{иг}} / \sin (180^\circ - \beta_{\text{н}}) = 0,5 D_{\text{ст}} / \sin \xi_1, \quad (2.70)$$

где $D_{\text{ст}}$ – диаметр ступицы.

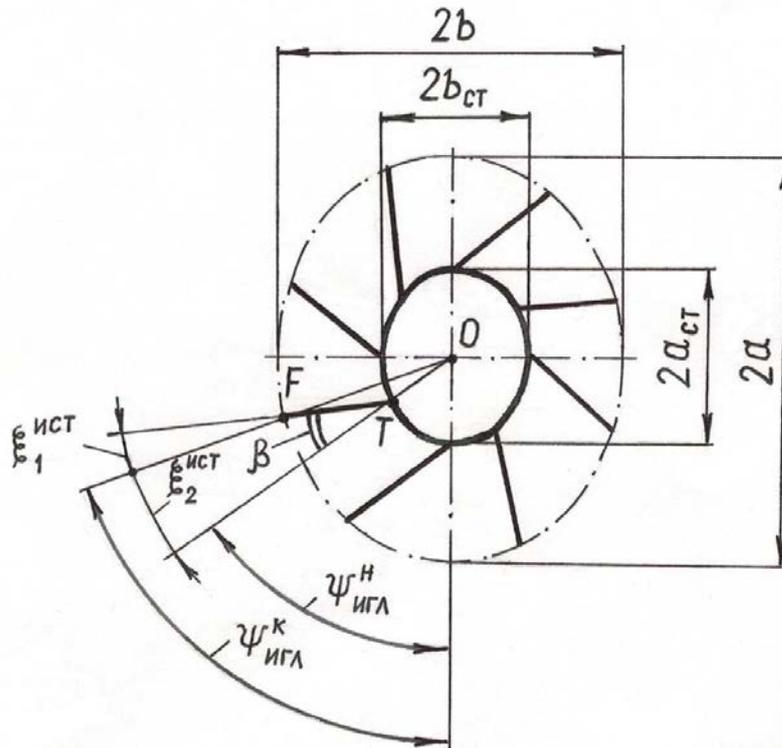


Рисунок 2.20 – Схема к определению длины игл

Из выражения (2.70) определяем угол ξ_1 , который на профильной плоскости является постоянной величиной по всему периметру диска:

$$\xi_1 = \arcsin (D_{ст} \sin \beta_n / D_{иг}). \quad (2.71)$$

Далее определяем угол ξ_2 :

$$\xi_2 = 180^\circ - (180^\circ - \beta_n) - \xi_1 = \beta_n - \xi_1. \quad (2.72)$$

Таким образом, формула (2.69) примет вид:

$$\varphi_{игл}^к = \varphi_{игл}^н + \beta_n - \xi_1. \quad (2.73)$$

В соответствии с формулой перевода (2.68) запишем зависимость для определения истинного угла фиксирования конечной точки F иглы:

$$\psi_{игл}^к = \arcsin (\sin \alpha \sin \varphi_{игл}^к / \sqrt{ \cos^2 \varphi_{игл}^к + (\sin \alpha \sin \varphi_{игл}^к)^2 }). \quad (2.74)$$

Истинное значение угла между полярным радиусом OF диска и полярным радиусом OT ступицы вычисляется из формулы:

$$\xi_2^{ист} = \psi_{игл}^к - \psi_{игл}^н. \quad (2.75)$$

Полярные радиусы диска и ступицы, которые проходят через начальную и конечную точки иглы, определяются в соответствии с уравнением (2.41) согласно соответствующим выражениям:

$$\rho_{\text{ст}}^{\text{н}} = OT = D_{\text{ст}} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{\text{игл}}^{\text{н}} + (\sin \alpha \cos \psi_{\text{игл}}^{\text{н}})^2}). \quad (2.76)$$

$$\rho_{\text{игл}}^{\text{к}} = OF = D_{\text{иг}} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{\text{игл}}^{\text{к}} + (\sin \alpha \cos \psi_{\text{игл}}^{\text{к}})^2}). \quad (2.77)$$

Длина $l_{\text{игл}}$ рассматриваемой иглы равна длине отрезка FT . (рисунок 2.20). На основании теоремы косинусов из треугольника OFT имеем:

$$l_{\text{игл}} = FT = \sqrt{(\rho_{\text{ст}}^{\text{н}})^2 + (\rho_{\text{игл}}^{\text{к}})^2 - 2 \rho_{\text{ст}}^{\text{н}} \rho_{\text{игл}}^{\text{к}} \cos \xi_2^{\text{ист}}}. \quad (2.78)$$

После подстановки в уравнение (2.78) составляющих членов из выражений (2.76) и (2.77), получим уравнение для вычисления длины игл в зависимости от углов расположения их на диске. Оно имеет вид:

$$\begin{aligned} l_{\text{игл}} = & \{ [D_{\text{ст}} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{\text{игл}}^{\text{н}} + (\sin \alpha \cos \psi_{\text{игл}}^{\text{н}})^2})]^2 + \\ & + [D_{\text{иг}} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{\text{игл}}^{\text{к}} + (\sin \alpha \cos \psi_{\text{игл}}^{\text{к}})^2})]^2 - \\ & - 2 [D_{\text{ст}} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{\text{игл}}^{\text{н}} + (\sin \alpha \cos \psi_{\text{игл}}^{\text{н}})^2})] \cdot \\ & [D_{\text{иг}} / (2 \sqrt{\sin^2 \psi_{\text{игл}}^{\text{к}} + (\sin \alpha \cos \psi_{\text{игл}}^{\text{к}})^2})] \cos \xi_2^{\text{ист}} \}^{1/2}. \end{aligned} \quad (2.79)$$

Особо отметим, что углы $\psi_{\text{игл}}^{\text{н}}$ и $\psi_{\text{игл}}^{\text{к}}$, входящие в уравнение (2.79), должны быть рассчитаны для каждой иглы в отдельности с учётом соответствующего значения профильного углового шага.

Конструктивные параметры диска и ступицы вычисляются с учётом зависимостей (2.34) по соответствующим формулам:

$$a = D_{\text{иг}} / (2 \sin \alpha); \quad b = D_{\text{иг}} / 2; \quad a_{\text{ст}} = D_{\text{ст}} / (2 \sin \alpha); \quad b_{\text{ст}} = D_{\text{ст}} / 2. \quad (2.80)$$

Анализ показывает, что результаты расчёта зависят от выбора начала системы отсчёта, т. е. от того, какую иглу мы принимаем в расчётах под номером один.

Удобно и более наглядно, когда за начало отсчёта рассчитываемого параметра выбирается игла, начальная точка T которой занимает крайнее нижнее по-

ложение, причём при этом большая ось $2a$ диска обязательно должна проходить через указанную точку. Далее нумерация игл идёт по часовой стрелке.

Практический расчёт, выполнен при исходных конструктивных параметрах: $D_{иг} = 0,4$ м; $D_{ст} = 0,14$ м; $k_{игл} = 16$; $\alpha = 65^\circ$; $\beta_H = 30^\circ$ (Приложение Г).

Профильный угловой шаг игл: $\varphi_{игл}^H = 360^\circ / 16 = 22,5^\circ$. Он в общем случае не зависит от выбора начала системы отсчёта.

Поскольку начальная точка первой иглы совпадает с началом системы отсчёта, то для неё $\varphi_{игл}^H = 0^\circ$. Для второй иглы $\varphi_{игл}^H = 22,5^\circ$, для третьей иглы $\varphi_{игл}^H = 45^\circ$, для четвертой иглы $\varphi_{игл}^H = 67,5^\circ$ и т. д.

В соответствии с выражениями (2.71) и (2.72) расчётные углы на профильной плоскости $\xi_1 = \arcsin(0,14 \cdot 0,5 / 0,4) = 10^\circ$; $\xi_2 = 30^\circ - 10^\circ = 20^\circ$.

Тогда согласно формуле (2.73) угол фиксирования конечной точки первой иглы $\varphi_{игл}^K = 20^\circ$, для второй иглы $\varphi_{игл}^K = 42,5^\circ$, для третьей иглы $\varphi_{игл}^K = 65^\circ$, для четвертой иглы $\varphi_{игл}^K = 87,5^\circ$ и т. д.

Углы $\psi_{игл}^H$, $\psi_{игл}^K$ рассчитываются, в свою очередь, исходя из значений углов $\varphi_{игл}^H$, $\varphi_{игл}^K$ по формулам перевода (2.68) и (2.74) соответственно.

Из графика (рисунок 2.21) видно, что длина игл диска по периметру диска меняется по синусоидальному закону.

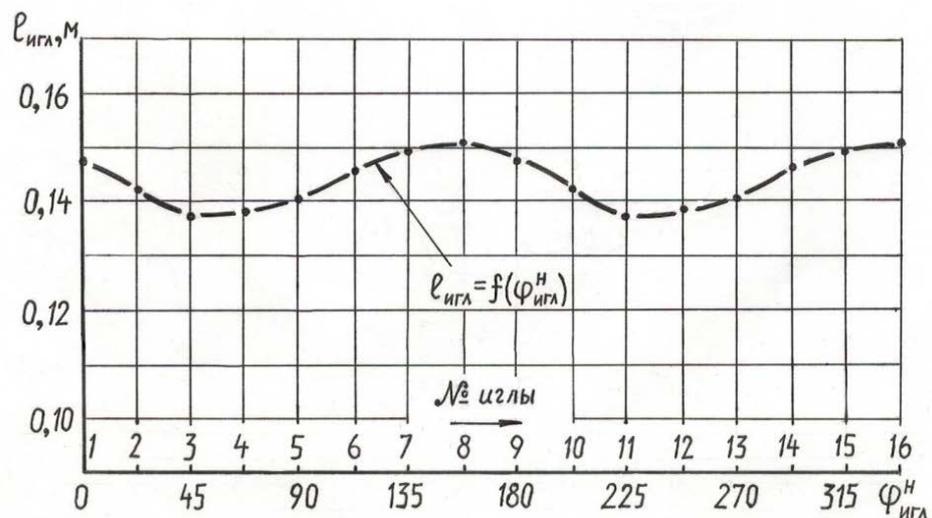


Рисунок 2.21 – График зависимости длины игл от профильного углового шага

Наибольшую длину, равную 0,1503 м., имеют восьмая и шестнадцатая иглы. К сведению, при этом полярный радиус диска равен 0,2206 м.

Третья и одиннадцатая иглы имеют минимальную длину, равную 0,1372 м, а радиус, проходящий через конечную точку игл, равен 0,2038 м.

Длина пятой и тринадцатой игл равна значению диаметра ступицы диска, т. е. 0,14 м, указанный полярный радиус в этом случае равен 0,2025 м.

Что касается конструктивной длины игл, то её значения, определённые согласно выражению (2.80), должны быть увеличены с учётом припуска на закрепление их на ступице диска на 20 – 25 мм.

2.3.7 Определение угла наклона игл к оси вращения, угла закрепления игл на ступице диска и величины погружения игл в почву

Закрепление игл на ступице обеспечивает их наклон к оси вращения под разными углами j (рисунок 2.22). От этого угла зависит степень деформации (рас- таскивания) почвы режущими кромками игл.

В расчётной схеме для исключения забивания межпальцевого пространства растительными остатками направление угла β установки (закрепления) игл на ступице диска противоположно направлению вращения диска. Заметим, что в случае вращения диска «снизу вверх» (по часовой стрелке) направление угла β совпадает с направлением вращения диска.

В качестве угла наклона игл к оси вращения в вертикально-поперечной плоскости принимаем угол наклона радиуса эллипсоидного диска к оси враще- ния, который проходит через начальные точки игл. Например, если взять иглу FT , то рассматриваемый параметр равен углу j наклона полярного радиуса AO эллип- соидного диска к оси вращения, который проходит через начальную точку T указанной иглы.

Сначала выводим аналитическую зависимость для вычисления угла наклона игл к оси вращения [4]. Рассматривая прямоугольный треугольник AOC , можно записать:

$$\sin j = OC / AO. \quad (2.81)$$

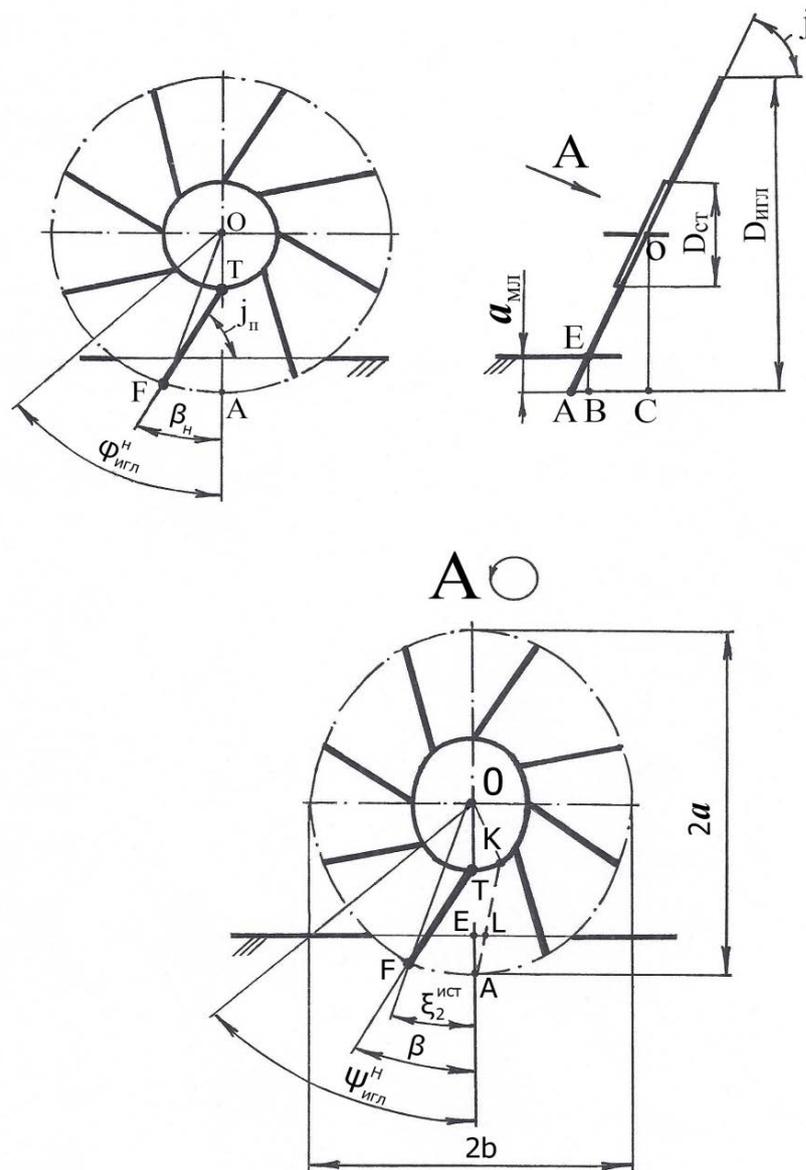


Рисунок 2.22 – Схема к определению угла наклона игл к оси вращения

С учётом того, что в общем случае $AO = \rho$, а $OC = D_{иг} / 2$, из выражения (2.81) имеем:

$$j = \arcsin [D_{иг} / (2\rho)]. \quad (2.82)$$

Подставив в выражение (2.82) значение полярного радиуса ρ диска из зависимости (2.78) с учётом соответствующего угла фиксирования начальных точек игл, получим окончательное уравнение для определения угла наклона игл к оси вращения в вертикально-поперечной плоскости. Оно имеет вид:

$$j = \arcsin \sqrt{\sin^2 \psi_{\text{игл}}^{\text{H}} + (\sin \alpha \cos \psi_{\text{игл}}^{\text{H}})^2}. \quad (2.83)$$

Данный угол рассчитывается для каждой иглы в отдельности с учётом соответствующих значений угла $\psi_{\text{игл}}^{\text{H}}$, который с учётом полярного углового шага $\varphi_{\text{игл}}^{\text{H}}$ определяется в соответствии с формулой перевода (2.68) согласно выражению:

$$\psi_{\text{игл}}^{\text{H}} = \arcsin (\sin \alpha \sin \varphi_{\text{игл}}^{\text{H}} / \sqrt{\cos^2 \varphi_{\text{игл}}^{\text{H}} + (\sin \alpha \sin \varphi_{\text{игл}}^{\text{H}})^2}). \quad (2.84)$$

Что касается угла β закрепления игл на плоскости ступицы, то он зависит от величины профильного угла β_{H} , значение которого изначально обосновывается из условия внедрения (вхождения) иглы в почву в вертикально-продольной плоскости со скольжением [9, 88]. С учётом теоретических предпосылок, изложенных в подразделе 2.3.4, данное условие имеет вид: $j_{\text{п}} > \varphi_{\text{тр}}$, здесь $j_{\text{п}}$ – угол вхождения игл в почву в вертикально-продольной плоскости; $\varphi_{\text{тр}}$ – угол трения скольжения почвы о рабочие поверхности иглы. С другой стороны, $j_{\text{п}} = 90^\circ - \beta_{\text{H}}$. Отсюда с учётом значения угла $j_{\text{п}}$ получим следующее неравенство:

$$\beta_{\text{H}} < 90^\circ - \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.85)$$

Если учесть среднее значение угла трения скольжения почвы, равное 30° (подраздел 2.2.3), то из неравенства (2.85) имеем, что $\beta_{\text{H}} < 60^\circ$. Для вычисления истинного значения угла β закрепления игл на самой ступице по всему её периметру рассмотрим треугольник OFT (изображение A рисунка 2.22). На основании теоремы синусов запишем:

$$OF / \sin (180^\circ - \beta) = FT / \sin \xi_2^{\text{ист}}. \quad (2.86)$$

Поскольку $OF = \rho_{\text{игл}}^{\text{K}}$; $FT = l_{\text{игл}}$, а $\sin (180^\circ - \beta) = \sin \beta$, это выражение принимает вид:

$$\rho_{\text{игл}}^{\text{K}} / \sin \beta = l_{\text{игл}} / \sin \xi_2^{\text{ист}}. \quad (2.87)$$

Угол $\xi_2^{\text{ист}}$ был подробно рассмотрен в подразделе 2.3.6 при определении длины игл по всему периметру диска.

Из выражения (2.87) можно найти формулу для вычисления искомого угла.

$$\beta = \arcsin (\rho_{\text{игл}}^{\text{K}} \sin \xi_2^{\text{ист}} / l_{\text{игл}}). \quad (2.88)$$

Уравнение (2.88) показывает, что угол β зависит от полярного радиуса диска, который проходит через конечную точку игл, углов фиксирования начальных

и конечных точек игл, а также длины игл и является переменным параметром. Это говорит о том, что каждая игла закрепляется на ступице диска с наклоном назад строго под своим расчётным углом.

В ходе технологического процесса иглы диска погружаются в почву на различную величину, причём иглы погружаются в почву на максимальную величину только в том случае, когда конечные их точки занимают крайнее нижнее положение. На рисунке 2.22 рассматриваемая игла изображена штриховой линией, конечная её точка F занимает крайнее нижнее положение, т. е. совпадает сточкой A .

Величина погружения игл в почву в вертикально-поперечной плоскости равна отрезку AE , которая определяется по формуле:

$$AE = a_{мл} / \sin j. \quad (2.89)$$

Для определения истинной величины q погружения игл в почву рассмотрим изображение A указанного выше рисунка. Здесь угол AOK равен углу $\xi_2^{ист}$. Поэтому угол OAK равен углу $\xi_4^{ист} = 180^\circ - \xi_2^{ист} - (180^\circ - \beta) = \beta - \xi_2^{ист}$.

Следовательно,

$$q = AL = AE / \cos \xi_4^{ист} = AE / \cos (\beta - \xi_2^{ист}).$$

С учётом формулы (2.89), окончательно имеем:

$$q = a_{мл} / [\sin j \cos (\beta - \xi_2^{ист})]. \quad (2.90)$$

Итоги практического расчёта (Приложение Г), проведённого при глубине обработки $a_{мл} = 0,04$ м и углах $\alpha = 65^\circ$, $\beta_H = 30^\circ$, показывают, что угол наклона игл к оси вращения и угол закрепления игл на ступице являются переменными параметрами.

Переменной также является величина погружения игл в почву по всему периметру. Заметим, что при рассмотрении углов j , β за начало отсчёта принята первая игла, следовательно, для неё профильный угловой шаг $\varphi_{игл}^H = 0^\circ$. Из графиков (рисунок 2.23), видно, что первая игла наклонена к оси вращения под минимальным углом $j = j_{min} = 65^\circ$. Угол закрепления данной иглы на ступице диска $\beta = 29,07^\circ$.

Пятая и тринадцатая иглы наклонены к оси вращения диска под углом $j = 90^\circ$, в данном случае угол закрепления игл на ступице $\beta = 32,63^\circ$.

Девятая игла диска наклонена к оси вращения под максимальным углом $j = j_{max} = 115^\circ$, здесь угол закрепления иглы на ступице $\beta = 29,07^\circ$.

Что касается величины погружения q игл в почву (рисунок 2.24), то в отличие от принятой ранее системы, за начало отсчёта принята игла, конечная точка которой занимает крайнее нижнее положение, причём при этом большая ось эллипса также проходит через эту точку.

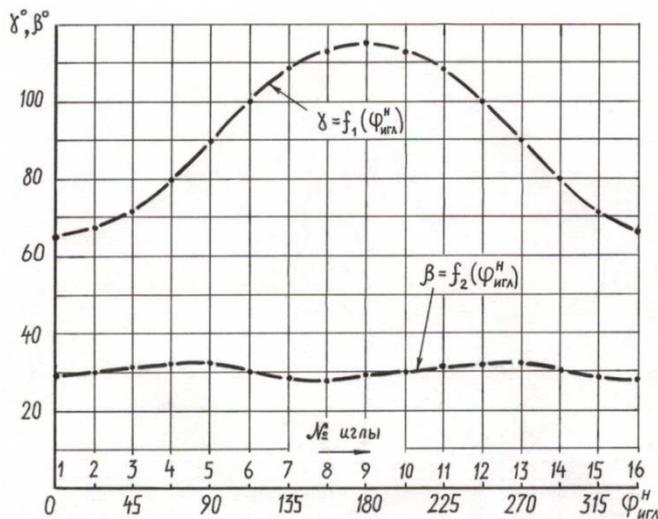


Рисунок 2.23 – Графики изменений угла наклона игл к оси вращения и угла закрепления игл на ступице диска

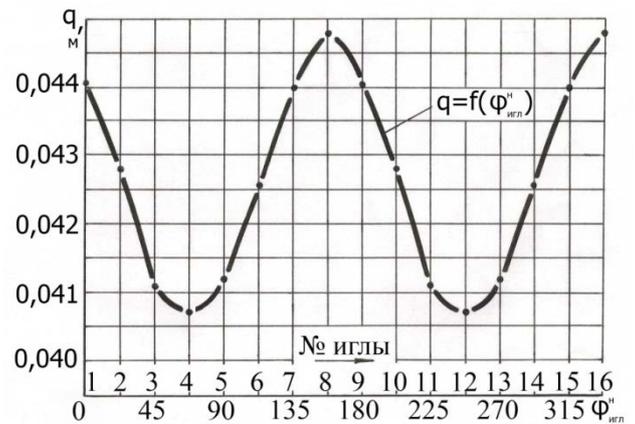


Рисунок 2.24 – График изменения величины погружения игл в почву

Из графика видно, что восьмая и шестнадцатая иглы погружаются в почву на максимальную величину: $q = q_{max} = 0,0448$ м, а четвёртая и двенадцатая иглы, наоборот, – на минимальную величину: $q = q_{min} = 0,0407$ м.

2.3.8 Определение угла резания почвы

При изучении данного вопроса в первую очередь рассматриваются углы начала резания почвы. Для этого нужно определить в первую очередь количество игл, одновременно находящихся в почве.

Иглы эллипсовидного диска режут почву своими режущими кромками поочерёдно. Для определения количества игл, одновременно находящихся в почве в

процессе мульчирования целесообразнее рассматривать профильную проекцию эллипсовидного диска (рисунок 2.25).

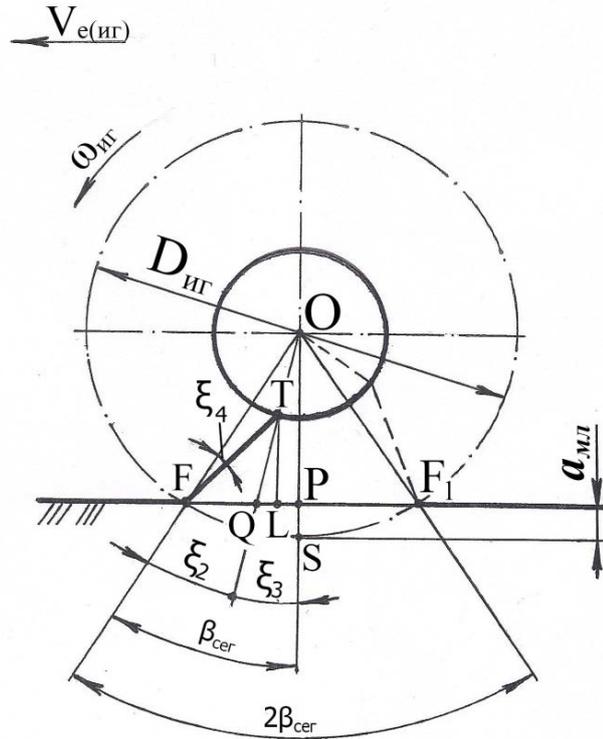


Рисунок 2.25 – Схема к определению количества игл, одновременно находящихся в почве

Центральный угол $2\beta_{\text{сег}}$ сегмента окружности, в котором иглы поочерёдно погружаются в почву, зависит от значений диаметра эллипсовидного диска и глубины мульчирования почвы.

Из прямоугольного треугольника FOP имеем:

$$\cos \beta_{\text{сег}} = OP / OF. \quad (2.91)$$

После подстановки в выражение (2.91) составляющих: $OP = D_{\text{иг}} / 2 - a_{\text{мл}}$; $OF = D_{\text{иг}} / 2$, находим формулу для вычисления половины центрального угла сегмента окружности:

$$\beta_{\text{сег}} = \arccos (1 - 2a_{\text{мл}} / D_{\text{иг}}), \quad (2.92)$$

где $a_{\text{мл}}$ – глубина мульчирования почвы, м.

В процессе мульчирования каждая игла проходит в почве определённый путь. Его профильная проекция равна длине дуги FF_1 окружности, которая определяется по формуле:

$$L_{\text{игл}} = 0,5D_{\text{иг}} \cdot 2\beta_{\text{сег}} = D_{\text{иг}} \beta_{\text{сег}}. \quad (2.93)$$

Интервал (длина дуги) J между иглами зависит от количества игл на диске и вычисляется согласно известному выражению:

$$J = \pi D_{\text{иг}} / k_{\text{игл}}. \quad (2.94)$$

Теперь с учётом выражений (2.93) и (2.94) можно определить количество игл, одновременно находящихся в почве в процессе мульчирования:

$$k_{\text{игл}}^{\text{раб}} = L_{\text{игл}} / J = \beta_{\text{сег}} k_{\text{игл}} / \pi. \quad (2.95)$$

При исходных данных: $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $a_{\text{мл}} = 0,04$ м и когда половина центрального угла сегмента $\beta_{\text{сег}} = \arccos(1 - 2 \cdot 0,04 / 0,4) = 36,86^\circ = 0,64$ рад, количество игл, которые одновременно находятся в почве $k_{\text{игл}}^{\text{раб}} = 0,64 \cdot 16 / 3,14 = 3,26$. Для дальнейших расчётов берём за основу $k_{\text{игл}}^{\text{раб}} = 3$.

Прежде чем приступить к определению угла начала резания почвы определяем угол $\xi_3^{\text{ист}}$ отклонения полярного радиуса от вертикали, который проходит через начальные точки игл (рисунок 2.26):

$$\xi_3^{\text{ист}} = \beta_{\text{сег}}^{\text{ист}} - \xi_2^{\text{ист}}. \quad (2.96)$$

Из прямоугольного треугольника FOP находим зависимость для вычисления истинного значения половины центрального угла эллипсовидного сегмента, которая имеет вид: $\beta_{\text{сег}}^{\text{ист}} = \arccos(OP / OF)$.

Поскольку $OP = OS - SP = D_{\text{иг}} / (2 \sin j) - a_{\text{мл}} / \sin j$, а $OF = \rho_{\text{игл}}^{\text{к}}$, окончательно получим:

$$\beta_{\text{сег}}^{\text{ист}} = \arccos [(D_{\text{иг}} - 2 a_{\text{мл}}) / (2 \sin j \rho_{\text{игл}}^{\text{к}})]. \quad (2.97)$$

Угол $\xi_2^{\text{ист}}$ между полярными радиусами, проходящими через начальную и конечную точки игл, был подробно рассмотрен ранее при определении длины игл диска (см. формулу 2.76).

Поставив в выражение (2.96) значения составляющих членов из формул (2.97) и (2.76) соответственно, получаем выражение для вычисления искомого угла:

$$\xi_3^{\text{ист}} = \arccos [(D_{\text{иг}} - 2 a_{\text{мл}}) / (2 \sin j \rho_{\text{игл}}^{\text{к}}) - (\psi_{\text{игл}}^{\text{к}} - \psi_{\text{игл}}^{\text{н}})]. \quad (2.98)$$

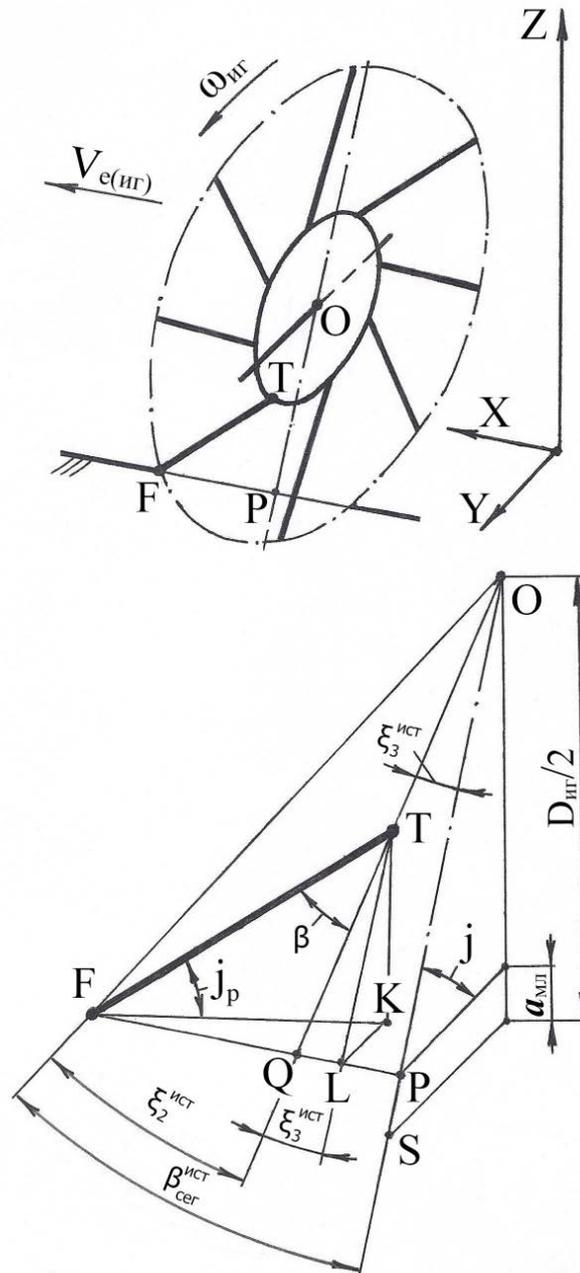


Рисунок 2.26 – Схема к определению угла начала резания почвы

Анализ показывает, что угол начала резания почвы режущими кромками игл является, по сути, пространственным углом. По этой причине для определения данного технологического параметра рассмотрим взаимосвязь прямоугольных треугольников, которые лежат в разных плоскостях.

Из прямоугольного треугольника FTL с учётом того, что $FT = l_{игл}$ находим значение катета TL :

$$TL = FT \cos(\beta + \xi_3^{ист}) = l_{игл} \cos(\beta + \xi_3^{ист}). \quad (2.99)$$

В свою очередь катет TL прямоугольного треугольника FTL является гипотенузой другого прямоугольного треугольника LTK . Следовательно, его катет TK можно вычислить из зависимости:

$$TK = TL \sin j = l_{\text{игл}} \cos (\beta + \xi_3^{\text{ист}}) \sin j. \quad (2.100)$$

Наконец, из третьего прямоугольного треугольника FTK можно найти выражение для вычисления угла начала резания почвы режущими кромками игл:

$$j_p = \arcsin (TK / FT). \quad (2.101)$$

После подстановки в выражение (2.101) значения катета TK из формулы (2.100), получим:

$$j_p = \arcsin [\cos (\beta + \xi_3^{\text{ист}}) \sin j]. \quad (2.102)$$

Из выражения (2.102) видно, что угол начала резания почвы рабочими кромками игл эллипсоидного диска – параметр также переменный, поскольку каждая игла имеет свой угол j наклона к оси вращения и свой угол β расположения на ступице. Для проверки достоверности теоретических зависимостей произведён практический расчёт (см. приложение Г) угла начала резания почвы режущими кромками игл при следующих рациональных исходных параметрах: $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $D_{\text{ст}} = 0,14$ м; $\alpha = 65^\circ$; $k_{\text{игл}} = 16$. Как и прежде за начало отсчёта принята игла, начальная точка которой занимает крайнее нижнее положение.

На основе результатов практического расчёта построен соответствующий график (рисунок 2.27).

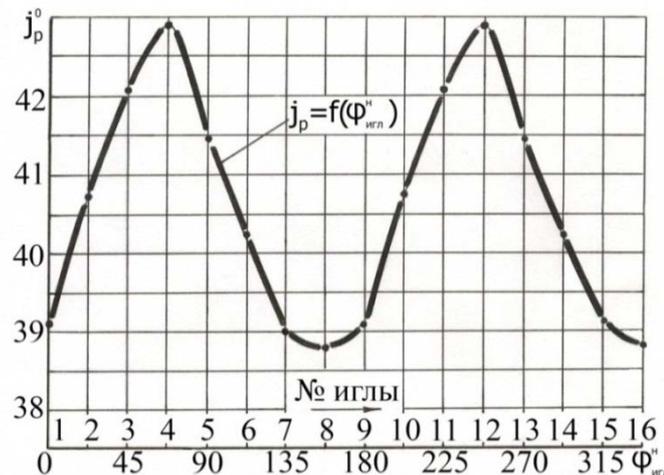


Рисунок 2.27 – График изменения угла начала резания почвы

Видно, что угол начала резания почвы режущими кромками игл изменяется в целом по синусоидальному закону. Углы начала резания почвы режущими кромками четвёртой и двенадцатой игл максимальны $j_p = j_{p_{max}} = 42,9^\circ$, угол расположения игл на самой ступице $\beta = 32,2^\circ$, а угол наклона игл к оси вращения $j = 79,8^\circ$.

Режущие кромки восьмой и шестнадцатой игл начинают резать почву под минимальным углом: $j_p = j_{p_{min}} = 38,7^\circ$. Здесь угол расположения этих игл на ступице диска является также минимальной величиной: $\beta = \beta_{min} = 27,4^\circ$, а угол наклона игл к оси вращения диска $j = 66,6^\circ$.

2.3.9 Определение толщины и площади почвенной стружки

Толщина почвенной стружки зависит от диаметра диска, количества игл на диске и показателя кинематического режима.

От толщины стружки зависит усилие, которое необходимо для резания почвы. Для теоретического определения толщины почвенной стружки проф. Матяшин Ю.И. [55] предлагает сложные трансцендентные уравнения.

В то же время для проектировочных расчётов предлагается более простой способ определения толщины почвенной стружки [9, 110].

Согласно способу данный технологический параметр определяется с достаточной степенью точности, причём при любом положении иглы, из соответствующих треугольников.

При рассмотрении этого вопроса удобнее на первом этапе воспользоваться профильной проекцией эллипсоидного игольчатого диска (рисунок 2.28), а затем учитывать наклонное его расположение в пространстве.

Для расчёта усилия резания берётся среднее значение толщины стружки, которое определяется из треугольника ABC :

$$b_{стр} = AC = AB \cos(90^\circ - \beta_{сер}) = S \sin \beta_{сер}, \quad (2.103)$$

где S – подача на одну иглу, м; $\beta_{сер}$ – половина угла сегмента окружности, т. е. угол на котором происходит резание почвы.

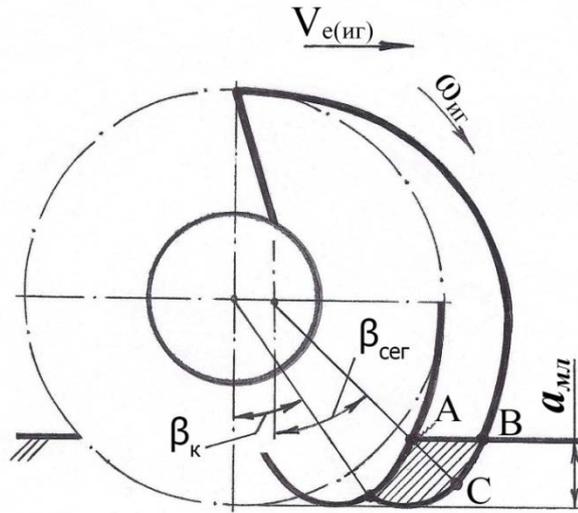


Рисунок 2.28 – Схема к определению толщины и площади почвенной стружки

После подстановки в данную формулу значения подачи из выражения (2.49), получим:

$$b_{\text{стр}} = \pi D_{\text{иг}} \sin \beta_{\text{сег}} / (\lambda k_{\text{игл}}), \quad (2.104)$$

где λ – показатель кинематического режима; $k_{\text{игл}}$ – количество игл, шт.

При определении усилия резания вычисляют площадь поперечного или бокового сечения снимаемой одной иглой почвенной стружки.

Площадь поперечного сечения стружки равна произведению средней толщины стружки на её ширину:

$$F = b_{\text{стр}} l_{\text{стр}} = \pi D_{\text{иг}} \sin \beta_{\text{сег}} l_{\text{стр}} / (\lambda k_{\text{игл}}), \quad (2.105)$$

где $b_{\text{стр}}$, $l_{\text{стр}}$ – толщина и ширина почвенной стружки, м.

Однако в расчётах предпочтительнее использовать площадь бокового сечения почвенной стружки (на рисунке заштрихована), которая с достаточной степенью точности вычисляется из следующей зависимости:

$$F_{\text{стр}} = S a_{\text{мл}}, \quad (2.106)$$

где S – подача на одну иглу, м; $a_{\text{мл}}$ – глубина мульчирования, м.

Подставляя в выражение (2.106) значения подачи из зависимости (2.49), окончательно получим:

$$F_{\text{стр}} = \pi D_{\text{иг}} a_{\text{мл}} / (\lambda k_{\text{игл}}). \quad (2.107)$$

При $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $a_{\text{мл}} = 0,04$ м; $\lambda = 2$; $k_{\text{игл}} = 16$ максимальное значение площади бокового сечения снимаемой почвенной стружки:

$$F_{\text{стр}} = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 0,04 / (2 \cdot 16) = 0,00157 \text{ м}^2.$$

Когда требуется высокая точность, площадь бокового сечения почвенной стружки можно скорректировать согласно уравнению [55]:

$$F_{\text{стр}} = (D_{\text{иг}})^2 [(-\pi \cos \beta_{\text{сег}}) / (\lambda k_{\text{игл}}) - \sin \beta_{\text{к}} / \lambda + 0,5 \beta_{\text{к}} + 0,25 \sin 2\beta_{\text{к}}] / 2,$$

где $\beta_{\text{к}} = \arccos (1 - 2 h_{\text{гр}} / D_{\text{иг}})$.

Итак, при $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $\lambda = 2$; $k_{\text{игл}} = 16$; $\beta_{\text{сег}} = 36,8^\circ$; $h_{\text{гр}} = 0,004$ м промежуточные данные:

$$\beta_{\text{к}} = \arccos (1 - 2 \cdot 0,004 / 0,4) = 11,47^\circ = 0,199 \text{ радиан}; \sin \beta_{\text{к}} = \sin 11,47^\circ = 0,1988; \sin 2\beta_{\text{к}} = \sin 22,94^\circ = 0,3897,$$

а площадь бокового сечения стружки:

$$F_{\text{стр}} = 0,16 [(-3,14 \cdot 0,8) / (2 \cdot 16) - 0,1988 / 2 + 0,5 \cdot 0,199 + 0,25 \cdot 0,3897] / 2 = 0,00152 \text{ м}^2.$$

Однако диск не круглый, и его иглы режут почву в вертикально-поперечной плоскости по наклонной траектории. Анализ показывает, что стружку максимального бокового сечения снимает та игла, которая наклонена к оси вращения под углом $j = \alpha$. Поэтому фактическую максимальную площадь бокового сечения снимаемой стружки можно уточнить по следующей формуле:

$$F_{\text{стр}}^{\text{факт}} = F_{\text{стр}} / \sin \alpha. \quad (2.108)$$

Для нашего случая при $\alpha = 65^\circ$: $F_{\text{стр}}^{\text{факт}} = 0,00152 / 0,9063 = 0,00167 \text{ м}^2$. Для дальнейших расчётов принимаем за основу полученное значение площади бокового сечения стружки.

2.3.10 Определение и обоснование диаметра иглы

Диаметр иглы эллипсовидного диска определяется из условия прочности иглы на изгиб при максимальном изгибающем моменте [71].

Движущаяся в почве стальная игла круглого сечения (рисунок 2.29), которая внедрена на максимальную глубину мульчирования преодолевает действие силы сопротивления почвы $P_{\text{спр}}^{\text{д}}$ различным видам деформации.

Она отклонена от нормали к рабочей поверхности иглы на угол трения $\varphi_{\text{тр}}$ [113].

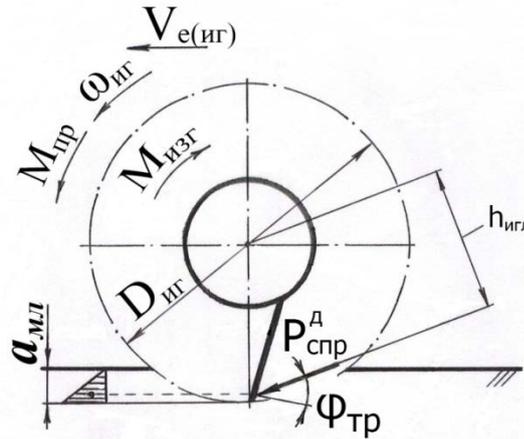


Рисунок 2.29 – Расчётная схема к определению диаметра иглы

Для наглядности здесь представлена профильная проекция диска в виде окружности. С учётом характера деформации почвы сила сопротивления почвы проходит на высоте $(1/3)a_{\text{мл}}$ от дна подошвы [115].

Изгибающий момент в рассматриваемом сечении иглы определяется по известной формуле:

$$M_{\text{изг}} = P_{\text{спр}}^{\text{иг}} h_{\text{иггл}}, \quad (2.109)$$

где $h_{\text{иггл}}$ – плечо приложения силы сопротивления почвы, м.

С учётом специфики конструкции эллипсовидного диска максимальную изгибающую нагрузку испытывают те иглы, которые имеют максимальную длину.

Как показали расчёты, максимальную длину имеют восьмая и шестнадцатая иглы. Углы j наклона их к оси вращения соответственно равны $113,36^\circ$ и $66,64^\circ$, а полярный радиус диска, который проходит через конечную точку этих игл $\rho_{\text{иггл}}^{\text{к}} = 0,2206$ м (Приложение Г). При определении плеча $h_{\text{иггл}}$ учитываем, как и прежде, наклонное расположение эллипсовидного диска, т. е. наклонное расположение указанных игл. Следовательно, формула для вычисления плеча имеет вид:

$$h_{\text{игл}} = [\rho_{\text{игл}}^{\text{к}} - a_{\text{мл}} / (3 \sin j)] \cos \varphi_{\text{тр}}. \quad (2.110)$$

При рациональных и заданных значениях параметров, т. е.: $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $a_{\text{мл}} = 0,04$ м, а также при $\varphi_{\text{тр}} = 30^\circ$ вычисляем значение плеча силы сопротивления почвы:

$$h_{\text{игл}} = [0,2206 - 0,04 / (3 \cdot 0,9180)] 0,8660 = 0,1784 \text{ м.}$$

В соответствии с выражением (2.137) формула для определения силы сопротивления почвы различным видам деформации, действующей на рассматриваемую иглу, имеет следующий вид:

$$P_{\text{спр}}^{\text{д}} = F_{\text{стр}}^{\text{факт}} (l_{\text{стр}} \rho g f_{\text{тр}} + k_{\text{спр}}^{\text{уд}}) + k_{\text{отб}} a_{\text{мл}} l_{\text{стр}} \rho (V_{\text{рез}} - V_{\text{е(иг)}}) V_{\text{рез}}. \quad (2.111)$$

После подстановки в выражение (2.109) значений $h_{\text{игл}}$ и $P_{\text{спр}}^{\text{д}}$, получаем уравнение для вычисления максимального изгибающего момента в сечении рассматриваемой иглы:

$$M_{\text{изг}} = [F_{\text{стр}}^{\text{факт}} (l_{\text{стр}} \rho g f_{\text{тр}} + k_{\text{спр}}^{\text{уд}}) + k_{\text{отб}} a_{\text{мл}} l_{\text{стр}} \rho (V_{\text{рез}} - V_{\text{е(иг)}}) V_{\text{рез}}] \cdot \{ [\rho_{\text{игл}}^{\text{к}} - a_{\text{мл}} / (3 \sin j)] \cos \varphi_{\text{тр}} \}. \quad (112)$$

Как известно [115], расчёт на прочность иглы на изгиб при максимальном изгибающем моменте производится согласно зависимости:

$$(M_{\text{изг}} / W_z) \leq [\sigma_{\text{изг}}], \quad (2.113)$$

где W_z – момент сопротивления сечения иглы при изгибе, м³; $[\sigma_{\text{изг}}]$ – допускаемое напряжение материала иглы при изгибе, Н / м².

Например, для иглы, изготовленной из стали 10Н допускаемое напряжение $[\sigma_{\text{изг}}] = 100 \text{ МПа} = 100 \cdot 10^6 \text{ Н / м}^2$ [5].

Момент сопротивления сечения иглы при изгибе определяется по формуле:

$$W_z = \pi d^3 / 32, \quad (2.114)$$

где d – диаметр иглы, м.

Подставив в неравенство (2.113) значения момента сопротивления сечения из зависимости (2.114), получим выражение для вычисления диаметра иглы эллипсоидного диска, которое имеет следующий окончательный вид:

$$d \geq \{32 M_{\text{изг}} / (\pi [\sigma_{\text{изг}}])\}^{1/3}. \quad (2.115)$$

При рациональных параметрах: $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $a_{\text{мл}} = 0,04$ м; $F_{\text{стр}}^{\text{факт}} = 0,00167$ м²; $l_{\text{стр}} = 0,01$ м; $\rho = 1100$ кг / м³; $f_{\text{тр}} = 0,577$; $[\sigma_{\text{изг}}] = 100$ МПа = $100 \cdot 10^6$ Н / м²; $k_{\text{спр}}^{\text{уд}} = 0,03$ МПа = $3 \cdot 10^4$ Н / м²; $\omega_{\text{иг}} = 22,7$ с⁻¹; $V_{\text{е(иг)}} = 2,27$ м / с; $V_{\text{рез}} = 4,03$ м / с; $h_{\text{игл}} = 0,1784$ м; $k_{\text{отб}} = 0,7$ максимальный изгибающий момент, действующий на иглу:

$$M_{\text{изг}} = [0,00167 (0,01 \cdot 1100 \cdot 9,81 \cdot 0,577 + 30000) + 0,7 \cdot 0,04 \cdot 0,01 \cdot 1100 \cdot (4,03 - 2,27) \cdot 4,03] \cdot 0,1784 = 9,346 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Следовательно, диаметр иглы в соответствии с формулой (2.115) должен удовлетворять условию:

$$d \geq [32 \cdot 9,346 / (3,14 \cdot 100 \cdot 10^6)]^{1/3} \geq 0,00983 \text{ м}.$$

Для дальнейших расчётов выбираем $d = 0,01$ м.

2.3.11 Расстановка игольчатых дисков на валу

Качество обработки почвы зависит от оптимального количества эллипсоидных игольчатых дисков в рабочей секции ротационного почвообрабатывающего орудия (рисунок 2.30).

Количество эллипсоидных игольчатых дисков зависит от ширины захвата B_c секции, амплитуды A движения конечной точки иглы и ширины $b_{\text{п}}$ так называемого взаимного перекрытия между дисками.

Амплитуда движения конечной точки иглы диска зависит от диаметра диска и угла наклона ступицы диска к оси вращения и вычисляется согласно формуле:

$$A = D_{\text{иг}} / \text{tg } \alpha. \quad (2.116)$$

Ширину $b_{\text{пер}}$ взаимного перекрытия между дисками, т. е. ширину стыкового перекрытия обработанных площадей смежными игольчатыми дисками выбираем равную $0,01 - 0,02$ м.

При заданных (известных) значениях конструктивных параметров орудия уравнение для определения ширины захвата секции имеет вид:

$$B_c = A k_{\delta} - b_{\text{пер}} (k_{\delta} - 1), \quad (2.117)$$

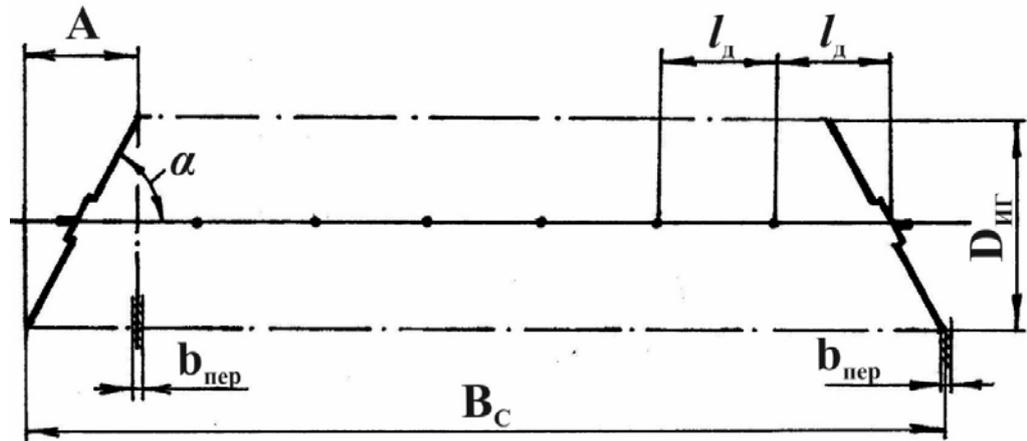


Рисунок 2.30 – Схема расстановки игольчатых эллипсовидных дисков

где k_δ – количество эллипсовидных игольчатых дисков в секции.

Из данного выражения можно определить количество эллипсовидных игольчатых дисков в каждой секции, обеспечивающих обработку почвы с заданным перекрытием:

$$k_\delta = (B_c - b_{пер}) / (A - b_{пер}). \quad (2.118)$$

Например, при исходных данных: $D_{иг} = 0,4$ м; $\alpha = 65^\circ$; $B_c = 1,8$ м и $b_{пер} = 0,01$ м, значение амплитуды $A = 0,186$ м, а количество дисков:

$$k_\delta = (1,8 - 0,01) / (0,186 - 0,01) = 10,17.$$

На практике количество дисков всегда целое число, поэтому полученное значение округляем до ближайшего целого числа: $k_\delta = 10$.

Расстояние между центрами (шаг расстановки) эллипсовидных игольчатых дисков вычисляется по формуле:

$$l_d = A - b_{пер}. \quad (2.119)$$

Для проектируемого модуля (секции) вычисляем шаг расстановки дисков $l_d = 0,186 - 0,0067 = 0,179 \cong 0,18$ м.

Таким образом, расчёт показывает, для обеспечения эффективной работы почвообрабатывающего орудия с шириной захвата 1,8 м, необходимо на валу секции размещать с шагом 0,18 м десять эллипсовидных игольчатых дисков, диаметр которых равен 0,4 м. Анализ показывает, что полностью уравновесить боковые реакции почвы возможно только в том случае, если большие оси (рисунок 2.31)

смежных эллипсоидных игольчатых дисков повернуть на угол $\beta_{иг}$, вычисляемый по формуле:

$$\beta_{иг} = 180 / (k_d - 1). \quad (2.120)$$

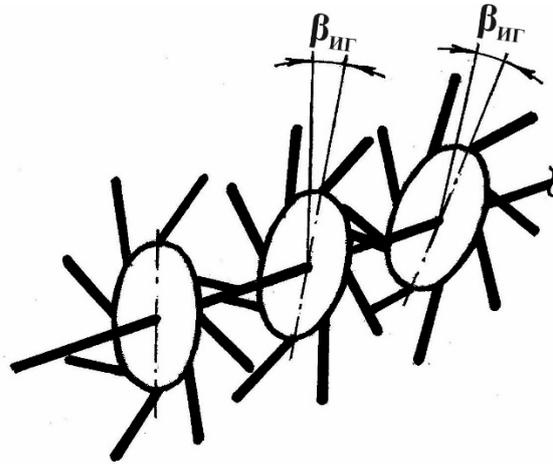


Рисунок 2.31 – Схема к уравновешиванию боковых реакций почвы

Например, для проектируемого модуля с указанными выше параметрами угол поворота больших осей смежных дисков: $\beta_{иг} = 180 / (10 - 1) = 20^\circ$.

Что касается самого вала ротационного орудия, то он с точки зрения сопротивления материалов подвергается сложному нагружению, т. е. воздействию как сжимающе-растягивающей силы, так и крутящего момента.

Уточнённая методика расчёта таких валов, которая учитывает связь между геометрическими параметрами валов и величиной деформации, разработана в Казанском ГАУ [102].

2.4 Теоретическое определение тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия

Теоретическое определение тягового сопротивления почвообрабатывающего орудия необходимо для сокращения энергии на выполнение технологической операции и выявления устойчивости его движения [36, 80, 133, 134, 135].

Тяговое сопротивление P_T ротационного почвообрабатывающего орудия складывается из тягового сопротивления $P_{спр}^{CB}$ спирально-винтового рабочего ор-

гана и тягового сопротивления $P_{\text{спр}}^{\text{иг}}$ эллипсоидных игольчатых дисков [68] (рисунок 2.32):

$$P_T = P_{\text{спр}}^{\text{св}} + P_{\text{спр}}^{\text{иг}}. \quad (2.121)$$

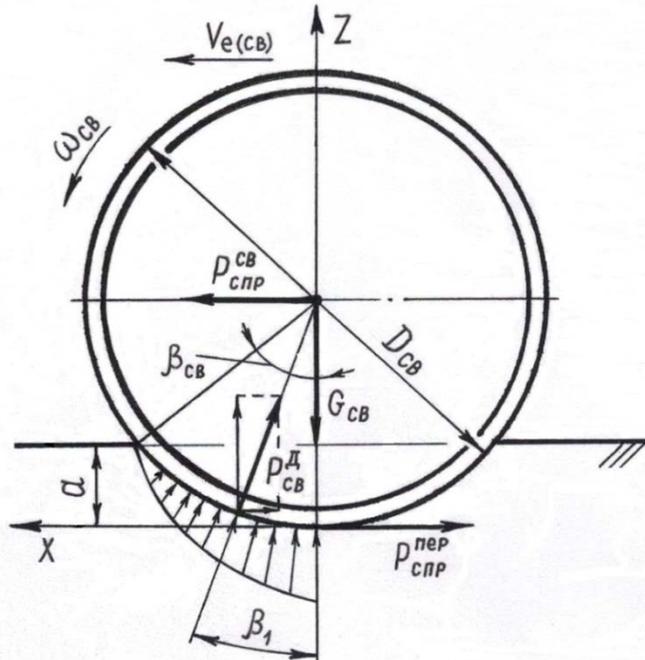


Рисунок 2.32 – Схема к определению тягового сопротивления

На пассивный спирально-винтовой рабочий орган действуют сила тяжести $G_{\text{св}}$, сила сопротивления почвы $P_{\text{спр}}^{\text{пер}}$ на перекатывание, а также сила сопротивления почвы $P_{\text{св}}^{\text{д}}$ различным видам деформации, которая складывается из сил сопротивления почвы на трение и сил сопротивления почвы на смятие.

Согласно исследованию [19], угол приложения силы сопротивления почвы $\beta_1 = 0,4 \beta_{\text{св}}$, здесь $\beta_{\text{св}}$ – угол контакта рабочего органа с почвой. Данный угол можно определить согласно формуле:

$$\beta_{\text{св}} = \arccos(1 - 2a / D_{\text{св}}). \quad (2.122)$$

Раздельное определение составляющих сил сопротивления почвы графоаналитическим методом составляет значительные трудности [113]. Поэтому при рассмотрении тягового сопротивления пассивных ротационных рабочих органов применяются различные методики, например [8, 17, 116], которые разработаны на основе рациональной формулы, предложенной акад. В.П. Горячкиным для опре-

деления тягового сопротивления плуга [18]. Взяв за основу основные положения указанных выше методик, запишем теоретическую зависимость для определения равнодействующей сил тягового сопротивления $P_{\text{спр}}^{\text{св}}$ спирально-винтового рабочего органа, которая имеет следующий вид [74]:

$$P_{\text{спр}}^{\text{св}} = P_{\text{спр}}^{\text{пер}} + P_{\text{св}}^{\text{д}} = P_{\text{спр}}^{\text{пер}} + P_{\text{спр}}^{\text{тр}} + P_{\text{спр}}^{\text{см}}, \quad (2.123)$$

где $P_{\text{спр}}^{\text{пер}}$ – сила сопротивления почвы на перекатывание, Н; $P_{\text{спр}}^{\text{тр}}$ – сила сопротивления почвы на трение, Н; $P_{\text{спр}}^{\text{см}}$ – сила сопротивления почвы на смятие, Н.

Сила сопротивления почвы на перекатывание рабочего органа вычисляется по формуле:

$$P_{\text{спр}}^{\text{пер}} = k_{\text{пер}} G_{\text{св}}, \quad (2.124)$$

где $k_{\text{пер}}$ – коэффициент сопротивления почвы перекатыванию, для вспаханного поля $k_{\text{пер}} = 0,2 - 0,28$ [113]; $G_{\text{св}}$ – сила тяжести спирально-винтового рабочего органа и приходящаяся на его долю сила тяжести орудия.

Сила сопротивления трения почвы о рабочие поверхности рабочего органа определяется согласно выражению: $P_{\text{спр}}^{\text{тр}} = f_{\text{тр}} N$, где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения скольжения почвы о рабочие поверхности; N – нормальная реакция почвы, Н.

В соответствии с выражением 2.19 силу сопротивления трения почвы можно определить по формуле:

$$P_{\text{спр}}^{\text{тр}} = f_{\text{тр}} G_{\text{св}} \cos \delta, \quad (2.125)$$

где δ – угол наклона образующей геликоида к поверхности почвы, градус.

Силу сопротивления почвы на смятие, как правило, определяют по так называемой формуле Грандвуане – Горячкина [39]:

$$P_{\text{спр}}^{\text{см}} = 0,86 k_{\text{нр}} [(G_{\text{св}})^{4/3} / (k_{\text{см}}^{1/3} B_{\text{св}}^{1/3} D_{\text{св}}^{2/3})], \quad (2.126)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, который учитывает рост сопротивления из-за неровности поверхности рабочего органа, $k_{\text{нр}} = 1,1 - 1,3$; $k_{\text{см}}$ – коэффициент объёмного смятия почвы, для вспаханного поля $k_{\text{см}} = (2 - 5) 10^6 \text{ Н/м}^3$, а для стерневого на $k_{\text{см}} = (10 - 20) 10^6 \text{ Н/м}^3$; $B_{\text{св}}$ – длина рабочего органа (ширина захвата секции), м; $D_{\text{св}}$ – диаметр спирально-винтового рабочего органа, м.

Подставляя в выражение (2.121) значения найденных выше составляющих членов, получаем уравнение для определения тягового сопротивления спирально-винтового рабочего органа:

$$P_{\text{спр}}^{\text{св}} = (k_{\text{пер}} + f_{\text{тр}} \cos \delta) G_{\text{св}} + 0,86 k_{\text{нр}} [(G_{\text{св}})^{4/3} / (k_{\text{см}}^{1/3} B_{\text{св}}^{1/3} D_{\text{св}}^{2/3})]. \quad (2.127)$$

Что касается эллипсоидного игольчатого диска активного принципа действия, то на него действует равнодействующая всех элементарных сил сопротивления почвы $P_{\text{иг}}^{\text{д}}$ различным видам деформации (рисунок 2.33), которая отклонена от нормали к рабочей поверхности иглы на угол трения $\varphi_{\text{тр}}$.

Сила тяжести $G_{\text{иг}}$ диска была учтена при определении тягового сопротивления спирально-винтового рабочего органа. С учётом того, что игольчатый диск вращается «сверху вниз», то направление горизонтальной составляющей P_x равнодействующей сил сопротивления почвы совпадает с направлением поступательной скорости агрегата.

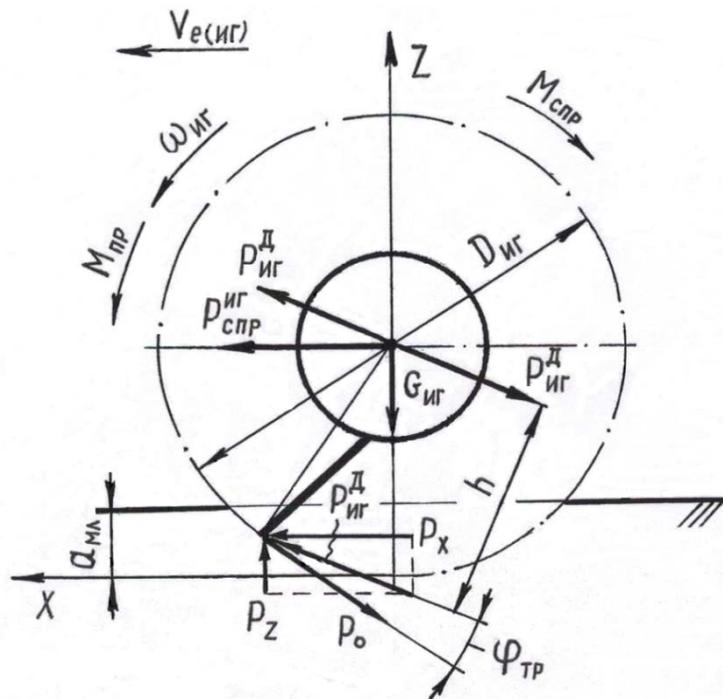


Рисунок 2.33 – Схема к определению тягового сопротивления игольчатого рабочего органа

Сила сопротивления почвы создает на валу диска момент сопротивления:

$$M_{\text{спр}} = P_{\text{иг}}^{\text{д}} h, \quad (2.128)$$

где h – плечо приложения силы сопротивления почвы, м.

Момент сопротивления уравновешивается приводным моментом:

$$M_{\text{пр}} = 2 P_0 / D_{\text{иг}}, \quad (2.129)$$

где P_0 – окружное усилие, Н.

С другой стороны, если по экспериментальным данным приводной момент известен, то из формулы (2.129) легко можно определить окружное усилие.

Поскольку и здесь раздельное определение сил сопротивления почвы графоаналитическим способом затруднено, тяговое сопротивление эллипсоидного игольчатого диска определяем по методике [113], которая была разработана также на основе рациональной формулы акад. В.П. Горячкина.

Согласно данной методике равнодействующая всех сил тягового сопротивления активных ротационных рабочих органов, в том числе эллипсоидного игольчатого диска складывается из сил сопротивления трения почвы о рабочую поверхность, а также сил сопротивления почвы резанию и отбрасыванию:

$$P_{\text{спр}}^{\text{иг}} = P_{\text{иг}}^{\text{д}} = P_{\text{спр}}^{\text{тр}} + P_{\text{спр}}^{\text{рез}} + P_{\text{спр}}^{\text{отб}}, \quad (2.130)$$

где $P_{\text{спр}}^{\text{тр}}$ – сила сопротивления трения почвы о рабочую поверхность иглы, Н; $P_{\text{спр}}^{\text{рез}}$ – сила сопротивления почвы резанию, Н; $P_{\text{спр}}^{\text{отб}}$ – сила сопротивления почвы отбрасыванию, Н.

Сила сопротивления трения определяется, как известно, произведением силы нормальной реакции почвы $N_{\text{п}}$ на коэффициент трения скольжения $f_{\text{тр}}$. В качестве нормальной реакции почвы принимается сила тяжести снимаемой одной иглой почвенной стружки, которая вычисляется по выражению:

$$N_{\text{п}} = F_{\text{стр}}^{\text{факт}} l_{\text{стр}} \rho g, \quad (2.131)$$

где $F_{\text{стр}}^{\text{факт}}$ – площадь бокового сечения почвенной стружки (см. формулу 2.108), м²; $l_{\text{стр}}$ – ширина почвенной стружки, м; ρ – плотность (объёмная масса) почвы, в расчётах принимается $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$, поскольку мульчирование производится по взрыхленной спирально-винтовым рабочим органом почве; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Следовательно, имеем:

$$P_{\text{спр}}^{\text{тр}} = N_{\text{п}} f_{\text{тр}} = F_{\text{стр}}^{\text{факт}} l_{\text{стр}} \rho g f_{\text{тр}}. \quad (2.132)$$

Силу сопротивления почвы резанию можно вычислить согласно следующей зависимости:

$$P_{\text{спр}}^{\text{рез}} = F_{\text{стр}}^{\text{факт}} k_{\text{спр}}^{\text{уд}}, \quad (2.133)$$

где $k_{\text{спр}}^{\text{уд}}$ – коэффициент удельного сопротивления почвы резанию, Н/м².

Анализ показывает, что коэффициент удельного сопротивления почвы резанию, предлагаемый отдельными авторами [39, 50, 109] при расчёте активных ротационных рабочих органов, в частности почвенных фрез, имеет различные значения.

Это объясняется тем, что данный параметр зависит от множества факторов технологического и конструктивного характера и условий испытания конкретной машины в конкретных почвенно-климатических условиях.

По данным проф. Канарёва Ф.М. [36], который анализировал различные литературные источники, включая зарубежных авторов, данный коэффициент равен $(0,03 - 0,05) \text{ МПа} = (0,03 - 0,05) 10^6 \text{ Н/м}^2$.

Сила сопротивления почвы отбрасыванию определяется согласно формуле [39]:

$$P_{\text{спр}}^{\text{отб}} = k_{\text{отб}} m_{\text{п}} V_{\text{рез}}, \quad (2.134)$$

где $k_{\text{отб}}$ – коэффициент отбрасывания почвы; $m_{\text{п}}$ – масса почвы, отбрасываемая иглой за одну секунду, кг/с; $V_{\text{рез}}$ – скорость резания в момент входа иглы диска в почву, м/с.

Коэффициент отбрасывания почвы зависит от скорости резания почвы и скорости поступательного движения орудия, $k_{\text{отб}} = 0,7 - 0,75$ [113].

В свою очередь масса почвы, отбрасываемая иглой за одну секунду, вычисляется по формуле:

$$m_{\text{п}} = a_{\text{мл}} l_{\text{стр}} \rho (V_{\text{рез}} - V_{\text{е(иг)}}), \quad (2.135)$$

где $a_{\text{мл}}$ – глубина мульчирования, м; $l_{\text{стр}}$ – ширина почвенной стружки, м; ρ – плотность (объёмная масса) почвы, кг/м³; $V_{\text{е(иг)}}$ – поступательная скорость, м/с.

Таким образом,

$$P_{\text{спр}}^{\text{отб}} = k_{\text{отб}} a_{\text{мл}} l_{\text{стр}} \rho (V_{\text{рез}} - V_{e(\text{иг})}) V_{\text{рез}}. \quad (2.136)$$

После подстановки в уравнение (2.130) значений составляющих членов из выражений (2.132 – 2.134), а также значения площади бокового сечения почвенной стружки из формулы (2.108), учитывая количество игольчатых дисков в секции и количество игл, одновременно находящихся в почве, получим выражение для определения тягового сопротивления секции эллипсовидных игольчатых дисков в целом:

$$P_{\text{спр}}^{\text{иг}} = k_{\delta} k_{\text{игл}}^{\text{раб}} \{ [\pi D_{\text{иг}} a_{\text{мл}} / (\lambda k_{\text{игл}} \sin \alpha)] (l_{\text{стр}} \rho g f_{\text{тр}} + k_{\text{спр}}^{\text{уд}}) + k_{\text{отб}} a_{\text{мл}} l_{\text{стр}} \rho (V_{\text{рез}} - V_{e(\text{иг})}) V_{\text{рез}} \}, \quad (2.137)$$

где k_{δ} – количество игольчатых дисков в секции; $k_{\text{игл}}^{\text{раб}}$ – количество игл, одновременно находящихся в почве.

Таким образом, окончательное уравнение для определения тягового сопротивления предлагаемого почвообрабатывающего орудия имеет следующий вид:

$$P_{\text{т}} = (k_{\text{пер}} + f_{\text{тр}} \cos \delta) G_{\text{св}} + 0,86 k_{\text{нр}} [(G_{\text{св}})^{4/3} / (k_{\text{см}}^{1/3} B_{\text{св}}^{1/3} D_{\text{св}}^{2/3})] + k_{\delta} k_{\text{игл}}^{\text{раб}} \{ [\pi D_{\text{иг}} a_{\text{мл}} / (\lambda k_{\text{игл}} \sin \alpha)] (l_{\text{стр}} \rho g f_{\text{тр}} + k_{\text{спр}}^{\text{уд}}) + k_{\text{отб}} a_{\text{мл}} l_{\text{стр}} \rho (V_{\text{рез}} - V_{e(\text{иг})}) V_{\text{рез}} \}. \quad (2.138)$$

В соответствии с выражением (2.43) скорость резания почвы в момент входа иглы в почву вычисляется по формуле:

$$V_{\text{рез}} = D_{\text{иг}} \omega_{\text{иг}} \sqrt{(1/\lambda - \sin \beta_{\text{сег}})^2 + \cos^2 \beta_{\text{сег}} (1/tg^2 \alpha + 1)} / 2, \quad (2.139)$$

где $\beta_{\text{сег}}$ – половина центрального угла сегмента окружности, в котором иглы поочередно погружаются в почву (см. формулу 2.92).

При $D_{\text{иг}} = 0,4$ м; $\omega_{\text{иг}} = 22,7$ с⁻¹; $\beta_{\text{сег}} = 36,8^\circ$; $\lambda = 2$; $\alpha = 65^\circ$:

$$V_{\text{рез}} = 0,4 \cdot 22,7 \sqrt{(1/2 - 0,599)^2 + 0,641 (\frac{1}{4,598} + 1)} / 2 = 4,03 \text{ м/с.}$$

Анализ уравнения (2.138) показывает, что тяговое сопротивление ротационного орудия для предпосевной обработки почвы зависит:

- *от конструктивных параметров* (масса орудия, диаметр спирально-винтового рабочего органа, диаметр игольчатых дисков, количество игл на диске, угол наклона ступицы игольчатого диска к оси вращения, количество игольчатых дисков в секции);

- *от кинематических параметров* (поступательная скорость агрегата, показатель кинематического режима работы);

- *от технологических параметров* (ширина захвата орудия, глубина мульчирования почвы, количество игл, одновременно находящихся в почве, подача на одну иглу, толщина снимаемой почвенной стружки);

- *от физико-механических и технологических свойств почвы* (плотность, коэффициент трения скольжения, коэффициент удельного сопротивления резанию, коэффициент объёмного смятия, коэффициент отбрасывания).

С учётом вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Обоснована конструктивно-технологическая схема предлагаемого ротационного почвообрабатывающего орудия, которое содержит коаксиально установленные на раме спирально-ленточный рабочий орган геликоидального типа и эллипсоидные игольчатые диски особой конструкции;

2. Обосновано рациональное значение диаметра спирально-винтового рабочего органа $D_{\text{св}} = 0,408 - 0,544$ м;

3. Определены угол наклона образующей геликоида к поверхности почвы $\delta > 19^\circ - 39^\circ$, угла наклона витка спирали $\varepsilon = 10^\circ - 25^\circ$, шага винтовой спирали $S_{\text{св}} = 0,36$ м и количества витков спирали $n_{\text{вит}} = 5$, количество навивки спирали $n_{\text{нав}} = 2 - 4$, количество квадратных винтовых прутков $n_{\text{прут}} = 4 - 8$;

4. Получены также параметрические уравнения движения конечной точки иглы эллипсоидного диска активного принципа действия;

5. Обосновано рациональное значение диаметра игольчатого диска $D_{\text{иг}} = 0,390 - 0,410$ м. Определены и обоснованы также рациональные значения показателя кинематического режима работы $\lambda = 2$ и количество игл на диске $k_{\text{игл}} = 16$;

6. Обосновано рациональное значение угла наклона ступицы игольчатого диска к оси вращения $\alpha = 60^\circ - 70^\circ$;

7. Получено аналитическое выражение для определения длины игл по всему периметру эллипсоидного диска. Выявлено, что длина $l_{игл}$ игл меняется по синусоидальному закону и меняется в пределах $0,1372 - 0,1503$ м;

8. Аналитическим способом получены теоретические зависимости для определения угла наклона игл к оси вращения. Расчёт показал, что первая игла наклонена к оси вращения под минимальным углом $j_{min} = 65^\circ$, пятая и тринадцатая иглы наклонены к оси вращения под углом 90° , девятая игла наклонена к оси вращения под максимальным углом $j_{max} = 115^\circ$. Получены также теоретические зависимости для определения угла закрепления игл на ступице. Выявлено, что каждая игла закрепляется на ступице диска под своим расчётным углом в пределах $29,0^\circ - 32,6^\circ$;

9. Из условия прочности иглы на изгиб при максимальном изгибающем моменте определено и обосновано рациональное значение диаметра иглы эллипсоидного диска $d = 0,010$ м;

10. Выявлено, что угол начала резания почвы рабочими кромками игл эллипсоидного диска является переменным параметром. Углы начала резания почвы четвёртой и двенадцатой игл максимальны $j_p = j_{p_{max}} = 42,9^\circ$. При этом угол расположения игл на самой ступице $\beta = 32,2^\circ$, а угол наклона игл к оси вращения $j = 79,8^\circ$. Восьмая и шестнадцатая иглы начинают резать почву под минимальным углом: $j_p = j_{p_{min}} = 38,7^\circ$. Здесь угол расположения этих игл на ступице диска является также минимальной величиной: $\beta = \beta_{min} = 27,4^\circ$, угол наклона игл к оси вращения диска $j = 66,6^\circ$;

11. Получено выражение для определения количества игл, одновременно находящихся в почве в процессе мульчирования. Практический расчёт, выполненный при $D_{иг} = 0,4$ м; $a_{мл} = 0,04$ м; $\beta_{сер} = 36,86^\circ = 0,64$ радиан показал, что количество игл, которые одновременно находятся в почве равно трём;

12. Получено аналитическое выражение для определения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия. Анализ итогового уравнения показал, что тяговое сопротивление орудия зависит от конструктивных, кинематических и технологических параметров, а также физико-механических и технологических свойств почвы.

3 ПРОГРАММА, ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Эксперименты были проведены для проверки работоспособности опытного образца орудия в полевых условиях, выявления устойчивости движения агрегата, обоснования отдельных параметров, а также для выявления влияния его параметров на агротехнические показатели работы. При проведении экспериментальных исследований были поставлены следующие задачи:

- обоснование конструктивно-технологической схемы орудия с коаксиально расположенными на раме спирально-винтовым и игольчатыми рабочими органами;

- обоснование рациональных конструктивных, кинематических и технологических их параметров.

С учётом задач исследования была разработана программа проведения экспериментальных исследований почвообрабатывающего орудия, которая предусматривала:

- разработка и изготовление опытного образца в условиях межкафедральной лаборатории Казанского ГАУ;

- проведение экспериментальных исследований для определения физико-механических свойств почвы и выявления влияния параметров опытного образца орудия на его тяговое сопротивление;

- выявление влияния конструктивных и технологических параметров ротационного почвообрабатывающего орудия на гребнистость обработанной поверхности и степень крошения почвы.

Эксперименты исследования, а также оценка ротационного почвообрабатывающего орудия по экономической и энергетической эффективности проводились согласно требованиям соответствующих нормативных документов [22, 25, 27, 28, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78].

3.2 Разработка и изготовление опытного образца

Теоретические исследования позволили изготовить опытный образец орудия в условиях межкафедральной лаборатории Казанского ГАУ (рисунок 3.1) с рациональными параметрами:

диаметр спирально-винтового рабочего органа, м	0,47
угол наклона витка винтовой спирали, градус	13,7
шаг винтовой спирали, м	0,36
количество витков спирали, шт	5
количество навивок винтовой спирали, шт	2
количество винтовых квадратных прутков, шт	4
угол наклона образующей поверхности винтовой спирали (образующей наклонного геликоида) к поверхности почвы, градус	30
диаметр эллипсовидного игольчатого диска, м	0,4
количество игл на эллипсовидном диске, шт	16
угол наклона ступицы, градус	65
угол установки дисков на валу, градус	20
шаг расстановки эллипсовидных игольчатых дисков, м	0,18
количество игольчатых дисков в каждой секции, шт	10
ширина захвата модуля, м	1,8

Опытный образец содержит раму 1 и систему навески 2. К несущей балке 3 закреплена почвообрабатывающая секция, состоящая из стоек 5, подшипниковых опор 6 и горизонтального вала 7.

На валу 7 на подшипниковых опорах 8 установлен спирально-винтовой рабочий орган 9, витки которого соединены между собой винтовыми прутками 10 квадратного сечения. На валу 7 коаксиально закреплены также эллипсовидные игольчатые диски 11, привод которых осуществляется при помощи гидромотора 12, жёстко закреплённого на стойке 13. Опорные колёса 14 опытного образца орудия шарнирно установлены на поводках 15, приваренных к трубе 16. Труба 16 установлена в подшипниковые опоры 17, а к ней в свою очередь приварен рычаг 18, который взаимодействует с тягой 19.



Рисунок 3.1 – Опытный образец орудия: 1 – рама; 2 – система навески; 3 – несущая балка; 4 – хомуты; 5 – стойки; 6, 8, 17 – подшипниковые опоры; 7 – горизонтальный вал; 9 – спирально-винтовой рабочий орган; 10 – винтовые квадратные прутки; 11 – эллипсовидные игольчатые диски; 12 – гидромотор; 13 – стойка гидромотора; 14 – опорные колеса; 15 – поводки; 16 – труба; 18 – рычаг; 19 – регулировочная тяга; 20 – тензометрическая навеска

Необходимая глубина обработки почвы достигается путём изменения длины тяги 19. Система навески трактора соединена с системой навески 2 орудия через тензометрическую навеску 20.

3.3 Разработка методики экспериментального исследования

Для измерения тягового сопротивления навесных сельскохозяйственных машин и орудий не налажено серийное производство специального оборудования, которое позволило бы с использованием современных информационных систем выполнить соответствующие измерения [14, 100, 101, 121]. В связи с этим, для динамометрирования навесных почвообрабатывающих орудий отдельные исследователи [40, 81] применяют различные устройства, которые содержат тензометрические датчики.

Согласно исследованиям проф. Валиева А.Р. [14], тяговое сопротивление навесных почвообрабатывающих машин и орудий целесообразнее определить с помощью тензометрической навески, которая в своё время была разработана сотрудниками ООО ВИСХОМ и содержит тензометрический S-образный датчик марки К-Р-16А. Принцип работы тензодатчика К-Р-16А основан на преобразовании механической силы растяжения или сжатия в электрический сигнал, техническая характеристика его позволяет проводить соответствующие измерения.

Тензометрическая навеска, изготовленная в Казанском ГАУ, содержит две треугольные конструкции 1 и 2, которые шарнирно соединены между собой через тензометрический S-образный датчик 4 (рисунок 3.2). Поэтому преобразованный электрический сигнал поступает на измерительную систему ИП-264 и далее – к персональному компьютеру с соответствующим программным обеспечением.

Тяговое сопротивление опытного образца определялось согласно требованиям ГОСТ Р 52777-2007 [20] с использованием описанной выше тензометрической навески методом планирования многофакторного эксперимента [71].

Частота вращения игольчатых дисков назначалась согласно формуле (2.37) с учётом показателя кинематического режима работы $\lambda = 2$ (выражение 2.61).

Следовательно, уровень варьирования частоты вращения дисков – 182 мин^{-1} ; 234 мин^{-1} ; 286 мин^{-1} (таблица 3.1).



Рисунок 3.2 – Тензометрическая навеска: 1, 2 – треугольные конструкции; 3 – шарниры; 4 – S-образный датчик; 5 – упорные болты; 6 – кронштейны; 7 – электрический кабель

Частота вращения игольчатых эллипсовидных дисков контролировалась (устанавливалась) при помощи лазерного бесконтактного тахометра (рисунок 3.3). Для этого на вал гидромотора предварительно приклеивалась фольговая отражательная метка (рисунок 3.4).



Рисунок 3.3 – Лазерный бесконтактный тахометр



Рисунок 3.4 – Фольговая отражательная метка

Таблица 3.1 – Уровни факторов эксперимента

Факторы эксперимента	Обозначение факторов натуральное	Обозначение факторов кодированное	Уровни варьирования натуральные			Уровни варьирования кодированные		
			верхний	основной	нижний	верхний	основной	нижний
Глубина обработки почвы, м	a	X_1	0,1	0,08	0,06	+1	0	-1
Поступательная скорость агрегата, км /ч	V_e	X_2	10,8	8,9	6,9	+1	0	-1
Частота вращения игольчатых дисков, мин ⁻¹	$n_{иг}$	X_3	286	234	182	+1	0	-1

Математическая модель технологического процесса составляется в виде уравнения множественной регрессии:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2, \quad (3.1)$$

где Y – функция отклика; X_1, X_2, X_3 – первый, второй и третий факторы эксперимента; b_0 – свободный член уравнения; $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коэффициенты уравнения, характеризующие весомость влияния факторов на функцию отклика.

Матрица планирования экспериментов представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Факторы эксперимента натуральные			Факторы эксперимента кодированные		
	a	V_e	$n_{иг}$	X_1	X_2	X_3
l	2	3	4	5	6	7
1	0,08	8,9	234	0	0	0

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7
2	0,06	8,9	234	-1	0	0
3	0,1	8,9	234	+1	0	0
4	0,08	6,9	234	0	-1	0
5	0,06	6,9	234	-1	-1	0
6	0,1	6,9	234	+1	-1	0
7	0,08	10,8	234	0	+1	0
8	0,06	10,8	234	-1	+1	0
9	0,1	10,8	234	+1	+1	0
10	0,08	8,9	182	0	0	-1
11	0,06	8,9	182	-1	0	-1
12	0,1	8,9	182	+1	0	-1
13	0,08	6,9	182	0	-1	-1
14	0,06	6,9	182	-1	-1	-1
15	0,1	6,9	182	+1	-1	-1
16	0,08	10,8	182	0	+1	-1
17	0,06	10,8	182	-1	+1	-1
18	0,1	10,8	182	+1	+1	-1
19	0,08	8,9	286	0	0	+1
20	0,06	8,9	286	-1	0	+1
21	0,1	8,9	286	+1	0	+1
22	0,08	6,9	286	0	-1	+1
23	0,06	6,9	286	-1	-1	+1
24	0,1	6,9	286	+1	-1	+1
25	0,08	10,8	286	0	+1	+1
26	0,06	10,8	286	-1	+1	+1
27	0,1	10,8	286	+1	+1	+1

Обработка полученных значений тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия производится по известной методике [65].

3.4 Приборы для определения физико-механических свойств почвы

Физико - механические свойства почвы в ходе проведения экспериментов определяются согласно требованиям ГОСТ 20915 - 2011 [23].

Пробы почвы на влажность отбираются почвенным буром конструкции Малькова – ВИУА с пятикратной повторностью.



Рисунок 3.5 – Приборы для определения влажности почвы:
1 – сушильный шкаф; 2 – бюксы;
3 – весы электронные



Рисунок 3.6 – Прибор ИП 271:
1 – корпус; 2 – аккумулятор;
3 – каретка; 4 – привод;
5 – кожух; 6 – электронный блок; 7 – датчик; 8 – кронштейн

Влажность почвы определяется в среднем образце. Для этого бур заглубляется на исследуемую глубину, затем, вынутый буром образец почвы из данного слоя, высыпается в тару, тщательно перемешивается и насыпается в алюминиевые бюксы (рисунок 3.5). По разности масс бюкса с почвой до и после высушивания определяется абсолютная влажность почвы.

Твёрдость почвы определяется при помощи мобильного прибора ИП 271 (рисунок 3.6) в местах определения влажности. Принцип действия прибора основан на измерении силы сопротивления почвы вертикально погружаемому в неё плунжеру посредством тензометрического датчика с последующим усилением и преобразованием электрического сигнала в цифровой код, отображаемый на экране дисплея электронного блока 6.

3.5 Приборы для определения агротехнических показателей

К агротехническим показателям работы опытного образца в полевых условиях относятся глубина обработки почвы, гребнистость поверхности и степень крошения почвы.

Глубина обработки почвы определяется при помощи металлической линейки от поверхности поля до дна образуемой борозды.

Равномерность обработки почвы определяется величиной отклонения средней глубины от заданной.

Гребнистость поверхности почвы измеряется при помощи переносного прибора ИП 250 (рисунок 3.7).

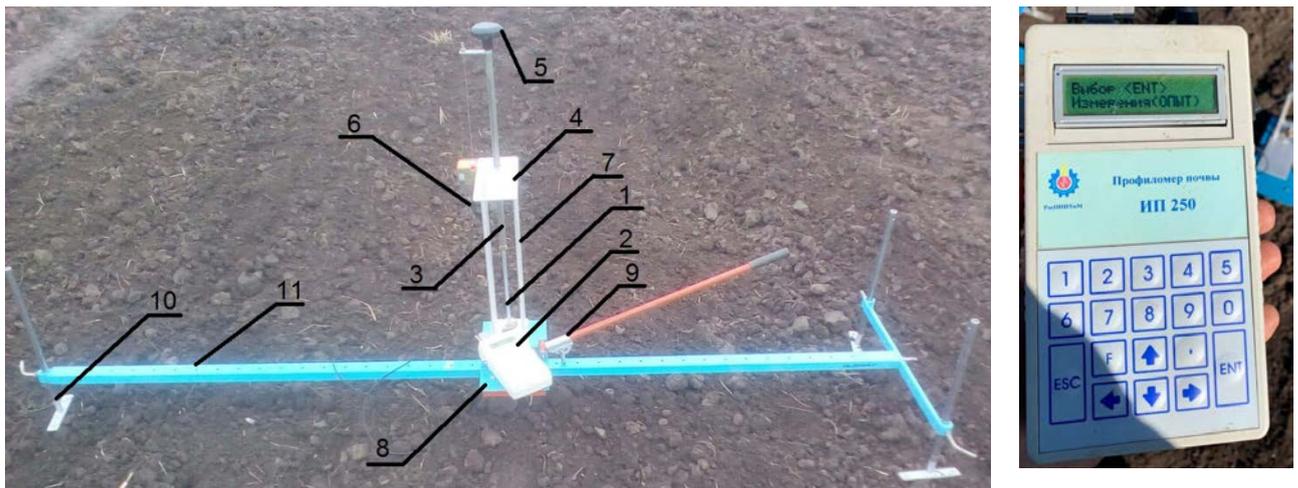


Рисунок 3.7 – Прибор для определения гребнистости поверхности почвы:
 1 – измерительный преобразователь; 2 – контроллер; 3 – шток;
 4 – измерительный блок; 5 – ручка штока; 6 – соединительный кабель;
 7 – стойки; 8 – складная каретка; 9 – фиксатор; 10 – опоры; 11 – направляющая

Гребнистость поверхности определяется исходя из разности высот между дном впадины и вершинами соседних с ней гребней с шагом в 50 мм по всей ширине захвата опытного образца. Для этого каретку 8 устанавливают на направляющую 11, а штوك 3 измерителя высоты – в верхнее положение. Далее рейка опускается до поверхности почвы. На дисплее контроллера 2 при этом высвечивается значение гребнистости в миллиметрах.

Степень крошения почвы определяется при помощи металлического контейнера 1 без нижней части (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Контейнер с лабораторными ситами: 1 – контейнер; 2, 3, 4 – сита лабораторные

Металлический контейнер опускается до глубины обработки. Захваченный контейнером объём почвы извлекается и взвешивается. Посредством лабораторных сит 2, 3 и 4 порция почвы разделяется на фракции: до 10 мм, 10 – 20 мм и 20 – 50 мм и взвешивается. Процентное соотношение разделённых фракций от общей массы даёт степень крошения почвы.

3.6 Результаты экспериментального определения тягового сопротивления опытного образца

Эксперименты проводились на полях ООО «Нармонка» Лаишевского района Республики Татарстан [127]. Тип почвы – среднесуглинистый, средняя влаж-

ность почвы равна 18,2 %, средняя плотность почвы – 1,13 г/см³, средняя твёрдость почвы – 1,35 МПа (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Фрагменты испытания опытного образца в полевых условиях

В ходе экспериментов тензодатчик (рисунок 3.10) тензометрической навески регистрирует силу, с которой почва сопротивляется перемещению опытного образца и направляет электрический сигнал в прибор ИП-264 (рисунок 3.11). На мониторе персонального компьютера тяговое сопротивление высвечивается в виде отдельных силограмм (Приложение 3).

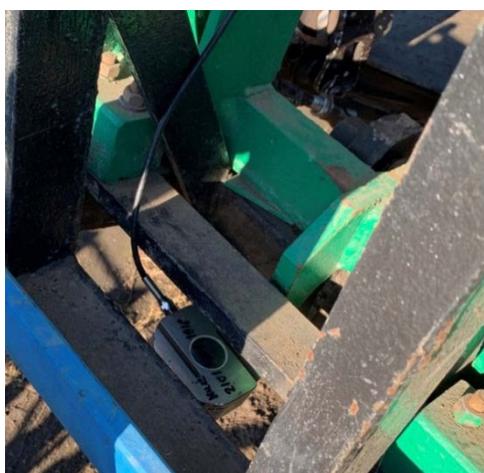


Рисунок 3.10 – Тензодатчик К-Р-16А



Рисунок 3.11 – Измерительно – информационная система с компьютером

Результаты экспериментов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты экспериментов

№ опыта	Тяговое сопротивление орудия, Н			
	Y_1	Y_2	Y_3	$Y_{cp i}$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1	1792	1783	1681	1752
2	1520	1663	1633	1605
3	1997	2043	1938	1993
4	1736	1700	1716	1718
5	1435	1437	1517	1463
6	1943	1956	1961	1953
7	1899	1825	1786	1837
8	1721	1842	1727	1763
9	2101	2120	2069	2097
10	1596	1855	1684	1711
11	1327	1382	1349	1352
12	1967	1983	2020	1991
13	1692	1714	1657	1688
14	1256	1211	1243	1236
15	1921	1924	1929	1925
16	1783	1885	1885	1851
17	1448	1568	1469	1495
18	1996	2010	2047	2018
19	1854	1808	1902	1854
20	1727	1741	1713	1727

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5
21	1993	2012	2054	2020
22	1828	1712	1703	1748
23	1581	1738	1677	1665
24	1970	1952	1991	1971
25	1973	1949	2039	1987
26	1894	1919	1881	1898
27	2092	2094	2347	2178

Для определения вида модели составлена корреляционная матрица факторов, которая приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Корреляционная матрица факторов

	X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$X_1 X_2 \cdot X_3$
X_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$X_1 \cdot X_2$	0,73	0,67	0	1	0	0	0	0	0	0
$X_1 \cdot X_3$	0,73	0	0,67	0,53	1	0	0	0	0	0
$X_2 \cdot X_3$	0	0,70	0,70	0,47	0,47	1	0	0	0	0
X_1^2	0,99	0	0	0,73	0,72	0	1	0	0	0
X_2^2	0	0,99	0	0,67	0	0,70	0	1	0	0
X_3^2	0	-0	1,0	0	0,67	0,70	-0	0	1	0
$X_1 X_2 \cdot X_3$	0,60	0,55	0,55	0,55	0,82	0,79	0,60	0,55	0,55	1

Значимость факторов определена исходя из критерия Стьюдента. Например, коэффициент корреляции фактора X_1 с фактором $X_1 X_2 \cdot X_3$ $r = 0,60$. Вычисляем значение критерия Стьюдента:

$$t_{рас} = r \sqrt{(n - 2) / \sqrt{1 - r^2}} = 0,60 \sqrt{(27 - 2) / \sqrt{1 - 0,60^2}} = 3,07. \quad (3.2)$$

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа опытов $n = 27$ из таблицы определяем критическое значение критерия Стьюдента: $t_{кр} = 2,06$.

Поскольку $t_{pac} > t_{kp}$, т. е. $3,07 > 2,06$ данный фактор исключается из уравнения регрессии.

Аналогично определена значимость факторов $X_1 \cdot X_2$, $X_1 \cdot X_3$, $X_2 \cdot X_3$, X_1^2 , X_2^2 , X_3^2 . Выявлено, что здесь также $t_{pac} > t_{kp}$. Следовательно, все они исключены из уравнения регрессии.

Таким образом, анализ элементов корреляционной матрицы показал, что факторы $X_1 \cdot X_2$, $X_1 \cdot X_3$, $X_2 \cdot X_3$, X_1^2 , X_2^2 , X_3^2 , $X_1 X_2 \cdot X_3$ значимо коррелированы с факторами X_1 , X_2 , X_3 . В связи с этим математическая модель в закодированном виде получается в виде линейного уравнения регрессии:

$$Y = 1817,30 + 219,00 \cdot X_1 + 96,99 \cdot X_2 + 95,26 \cdot X_3. \quad (3.3)$$

По коэффициентам уравнения (3.3) оценено влияние каждого фактора на поведение отклика (Y), поскольку все они имеют одинаковую размерность. Сравнивая значения коэффициентов между собой, можно сделать вывод, что влияние фактора X_1 на изменчивость Y примерно в два раза сильнее, чем влияние факторов X_2 и X_3 . Влияние же факторов X_2 и X_3 на изменчивость Y примерно одинаковое.

В результате обработки экспериментальных данных (таблица 3.3) с помощью метода наименьших квадратов была получена математическая модель в натуральных величинах:

$$P_T = 72,43 + 10950,00 a + 49,74 \cdot V_e + 1,83 \cdot n_{иг}. \quad (3.4)$$

Для выявления значимости коэффициентов математической модели (3.4) определены расчётные значения критерия Стьюдента: $t_{b1} = 12,24$; $t_{b2} = 5,52$; $t_{b3} = 5,42$. Из таблицы распределения критическое значение критерия Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степени свободы $\nu = n - p - 1 = 27 - 3 - 1 = 23$ (n – число опытов; p – число факторов) следующее: $t_{kp} = 2,07$. Все коэффициенты математической модели (3.3) значимы, поскольку выполняются условия: $t_{b1} = 12,24 > t_{kp} = 2,07$; $t_{b2} = 5,52 > t_{kp} = 2,07$; $t_{b3} = 5,42 > t_{kp} = 2,07$.

Адекватность математической модели была проверена по критерию Фишера, расчётное значение которого имеет вид:

$$F_{расч} = R^2(n - p - 1) / [(1 - R^2)p] = 0,90(27 - 3 - 1) / [(1 - 0,90)3] = 69,88, \quad (3.5)$$

где R^2 – коэффициент детерминации; n – число опытов, $n = 27$; p – число факторов, $p = 3$.

Коэффициент детерминации вычислен согласно выражению:

$$R^2 = \sum_{i=1}^{27} (Y_{i\text{расч}} - Y_{\text{ср}i})^2 / \sum_{i=1}^{27} (Y_{i\text{экс}} - Y_{\text{ср}i})^2 = 0,90. \quad (3.6)$$

где $Y_{i\text{расч}}$, $Y_{i\text{экс}}$, $Y_{\text{ср}i}$ – соответственно расчетное, экспериментальное и среднее значение отклика.

Из таблицы распределения для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и степеней свободы $\kappa_1 = p = 3$ и $\kappa_2 = n - p - 1 = 27 - 3 - 1 = 23$ определен критерий Фишера: $F_{kp} = 3,05$. Поскольку $F_{\text{рас}} = 69,88 \gg F_{kp} = 3,05$ математическая модель является адекватной.

Для повышения надёжности статистических выводов была проведена проверка адекватности математической модели по критерию средней относительной погрешности. Результаты анализа представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты анализа математической модели

№ п/п	$Y_{\text{ср}i}$	Y	$\varepsilon = Y_{\text{ср}i} - Y$	$ \varepsilon / Y_{\text{ср}i} \cdot 100,$ %	ε^2
1	2	3	4	5	6
1	1752	1753,83	-1,83	0,10	3,36
2	1605	1534,83	70,17	4,37	4923,53
3	1993	1972,83	20,17	1,01	406,74
4	1718	1689,17	28,827	1,68	830,97
5	1463	1470,17	-7,173	0,49	51,46
6	1953	1908,17	44,827	2,30	2009,42
7	1837	1883,15	-46,15	2,51	2129,79
8	1763	1664,15	98,85	5,61	9771,40
9	2097	2102,15	-5,15	0,25	26,52

Продолжение таблицы 3.5

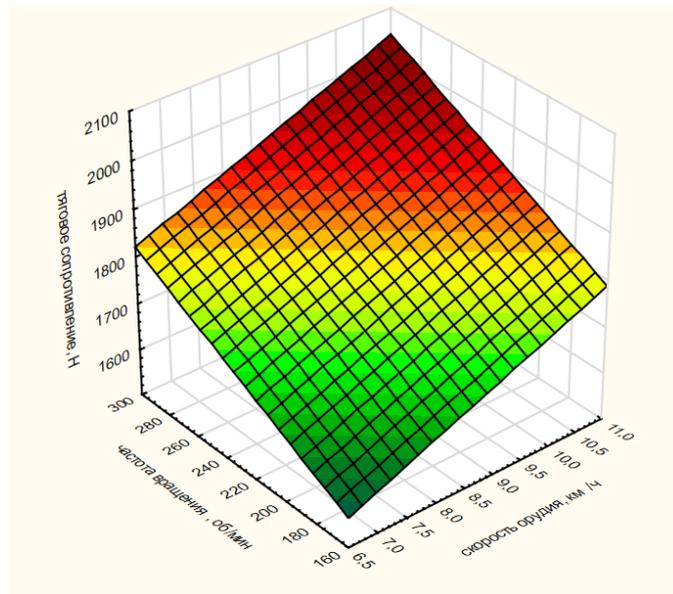
1	2	3	4	5	6
10	1711	1689,71	21,289	1,24	453,23
11	1352	1470,71	-118,7	8,78	14092,27
12	1991	1908,71	82,289	4,13	6771,50
13	1688	1625,05	62,948	3,73	3962,44
14	1236	1406,05	-170,1	13,76	28917,72
15	1925	1844,05	80,948	4,21	6552,56
16	1851	1819,03	31,972	1,73	1022,19
17	1495	1600,03	-105	7,03	11030,95
18	2018	2038,03	-20,03	0,99	401,13
19	1854	1880,24	-26,24	1,42	688,68
20	1727	1661,24	65,757	3,81	4324,02
21	2020	2099,24	-79,24	3,92	6279,41
22	1748	1815,58	-67,58	3,87	4567,60
23	1665	1596,58	68,416	4,11	4680,75
24	1971	2034,58	-63,58	3,23	4042,92
25	1987	2009,56	-22,56	1,14	508,96
26	1898	1790,56	107,44	5,66	11543,32
27	2178	2228,56	-50,56	2,32	2556,33
Сумма	48496	48496,00	0,00	93,38	132549,15
Среднее	1796,15	1796,15	0,00	3,46	1510,17

Расчёт показывает, что среднее значение критерия $|\varepsilon / Y_{срi}|$ относительной погрешности равно 3,46 %. Математическая модель является адекватной, т. к. среднее значение относительной погрешности не превышает 10 %.

Для того, чтобы проверки адекватности математической модели по критериям Фишера и средней относительной погрешности были корректными, проверялось выполнение для неё условий Гаусса-Маркова.

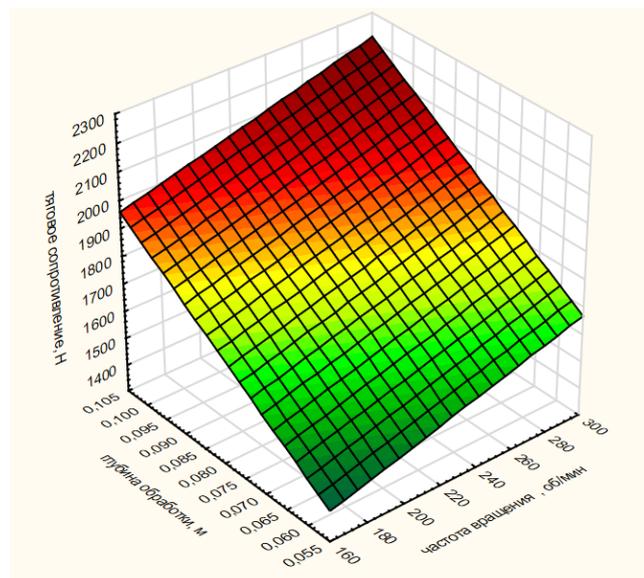
Расчёты показали, что математическая модель удовлетворяет условиям Гаусса-Маркова, т.е. оценки параметров метода наименьших квадратов являются несмещёнными, состоятельными и эффективными, т. е. они имеют наименьшие дисперсии. В целях сокращения объёма работы, расчёты здесь не приводятся.

Из рисунков 3.12 – 3.14 видно, что построенные поверхности отклика носят линейный характер.



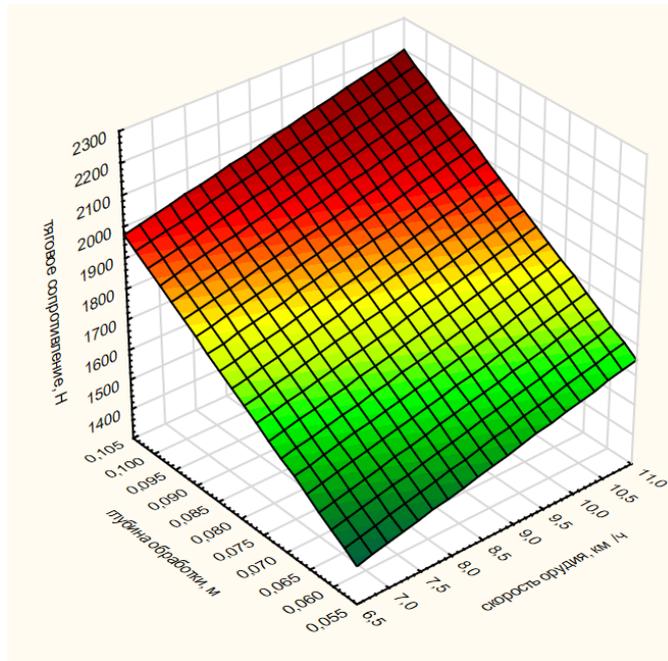
$$P_T = 948,43 + 49,74 \cdot V_e + 1,83 \cdot n_{иг} \quad (\text{при } a = 0,08 \text{ м}).$$

Рисунок 3.12 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления



$$P_T = 515,10 + 10950 \cdot a + 1,83 \cdot n_{иг} \quad (\text{при } V_e = 8,9 \text{ км/ч}).$$

Рисунок 3.13 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления



$$P_T = 501,12 + 10950 \cdot a + 49,74 \cdot V_e \quad (\text{при } n_{\text{иг}} = 234 \text{ мин}^{-1}).$$

Рисунок 3.14 – Поверхность отклика зависимости тягового сопротивления

Видно, что с увеличением глубины обработки почвы, скорости агрегата и частоты вращения игольчатых дисков тяговое сопротивление опытного образца увеличивается.

В заключение решалась задача выбора рациональных значений глубины обработки почвы, скорости агрегата, частоты вращения игольчатых дисков, которые в пределах проведённых экспериментов обеспечивают минимальное тяговое сопротивление опытного образца.

Для решения данной задачи была составлена математическая модель, которая имеет следующий вид:

$$\min P_T = \min (72,43 + 10950,00 a + 49,74 \cdot V_e + 1,83 \cdot n_{\text{иг}}). \quad (3.7)$$

Задача решалась при условиях:

$$0,06 \text{ м} \leq a \leq 0,1 \text{ м};$$

$$6,9 \text{ км/ч} \leq V_e \leq 10,8 \text{ км/ч};$$

$$182 \text{ мин}^{-1} \leq n_{\text{иг}} \leq 286 \text{ мин}^{-1}$$

с помощью надстройки «Поиск решений» табличного процессора Excel, который входит в состав интегрированного пакета прикладных программ Microsoft Office.

С учётом постановки задачи получены следующие рациональные параметры технологического процесса: глубина обработки почвы $a = 0,06$ м, скорость движения агрегата $V_e = 6,9$ км/ч, частота вращения эллипсовидных игольчатых дисков $n_{иг} = 182$ мин⁻¹.

3.7 Результаты полевых испытаний опытного образца по оценке агротехнических показателей

Полевые испытания опытного образца ротационного почвообрабатывающего орудия на предмет оценки агротехнических показателей проведены в соответствии с методикой, описанной в подразделе 3.5 на участке поля ООО «Нармонка» Лаишевского района Республики Татарстан. Почва участка среднесуглинистого состава. Средняя влажность почвы составила 18,2 %, средняя плотность почвы – 1,13 г/см³, средняя твёрдость почвы – 1,35 МПа.

Фактическая глубина обработки почвы определялась при помощи металлической линейки. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты экспериментов по определению глубины обработки

Установленная глубина обработки почвы, м	Скорость движения агрегата, км/ч	Частота вращения игольчатых дисков, мин ⁻¹	Номер опыта / фактическая глубина обработки почвы, м					Фактическая средняя глубина обработки, м
			1	2	3	4	5	
0,06	8,9	286	0,069	0,067	0,07	0,066	0,069	0,068
0,08	10,8	182	0,09	0,089	0,084	0,087	0,089	0,087
0,1	6,9	234	0,108	0,11	0,109	0,105	0,11	0,108

Результаты экспериментов показывают, что фактические средние значения глубины обработки почвы лежат в пределах допустимых отклонений (± 10 мм), которые предусмотрены агротехническими требованиями на предпосевную обработку почвы.

При оценке гребнистости поверхности и степени крошения почвы опытный образец работал при рациональном значении кинематического режима, т. е. $\lambda = 2$, которое было обосновано аналитическим путём исходя из допустимых значений высоты образуемых гребешков подошвы, регламентированных агротехническими требованиями [27].

Результаты экспериментов по определению гребнистости представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты экспериментов по определению гребнистости поверхности поля

Номер опыта	Глубина обработки почвы, м	Скорость движения агрегата, км/ч	Частота вращения игольчатых дисков, мин ⁻¹	Гребнистость поверхности, мм
1	0,06	8,9	234	18,7
2	0,06	6,9	182	21,8
3	0,06	10,8	286	16,2
4	0,08	8,9	234	17,9
5	0,08	6,9	182	19,7
6	0,08	10,8	286	15,6
7	0,1	8,9	234	16,3
8	0,1	6,9	182	18,5
9	0,1	10,8	286	15,2

Из таблицы 3.7 и графиков (рисунок 3.15) видно, что при различных значениях режимных показателей (скорость движения агрегата, частота вращения дисков) и глубине обработки почвы численные значения гребнистости Γ_p поверхности различны и составляют 15,2 – 21,8 мм.

С увеличением скорости движения агрегата, следовательно, частоты вращения эллипсоидных игольчатых дисков значения гребнистости поверхности уменьшаются.

Опыты показали, что при повышенных режимных показателях спиральный рабочий орган и игольчатые эллипсоидные диски лучше выравнивают обработанную поверхность.

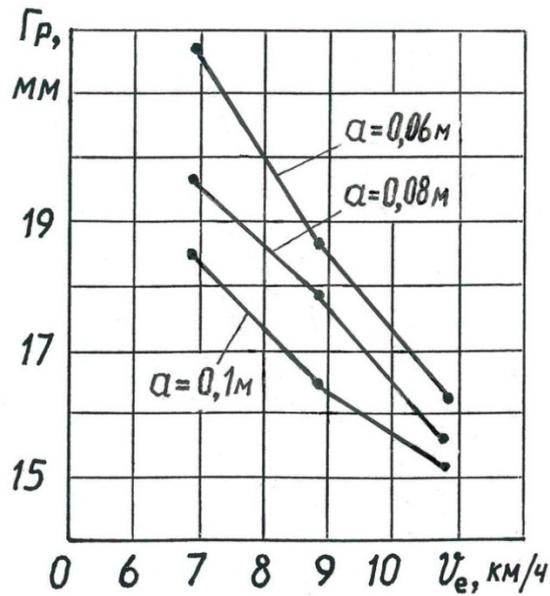


Рисунок 3.15 – Графики зависимости гребнистости поверхности почвы

Экспериментальные данные удовлетворяют агротехническим требованиям, т.к. высота гребней в целом не превышает 30 – 40 мм [26].

Результаты экспериментов по определению степени крошения почвы представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты экспериментов по определению степени крошения почвы

Номер опыта	Глубина обработки почвы, м	Скорость движения агрегата, км/ч	Частота вращения игольчатых дисков, мин ⁻¹	Степень крошения почвы, %
1	0,06	8,9	234	88,6
2	0,06	6,9	182	87,0
3	0,06	10,8	286	89,8
4	0,08	8,9	234	89,9
5	0,08	6,9	182	88,7
6	0,08	10,8	286	90,4
7	0,1	8,9	234	90,1
8	0,1	6,9	182	89,4
9	0,1	10,8	286	90,8

Из таблицы 3.8 и графиков (рисунок 3.16) видно, что с увеличением скорости движения агрегата, следовательно, частоты вращения игольчатых дисков степень крошения K_p почвы увеличивается.

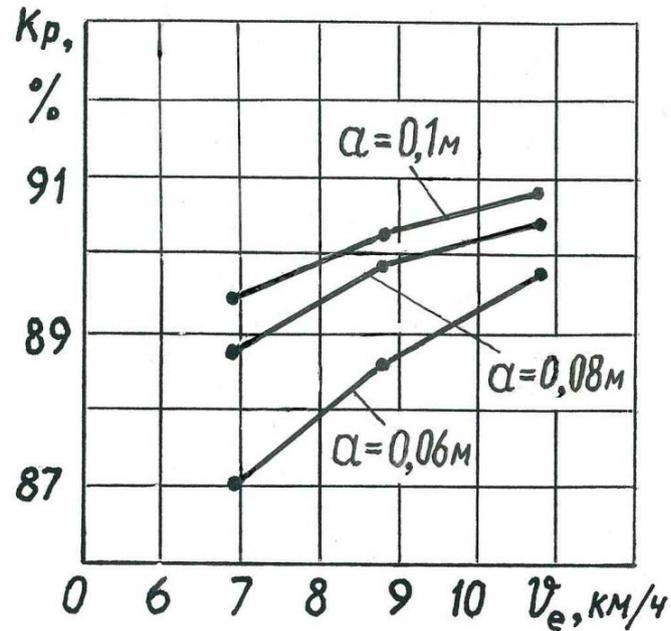


Рисунок 3.16 – Графики крошения почвы

Например, когда глубина обработки почвы равна 0,08 м, скорость движения агрегата – 6,9 км/ч, частота вращения игольчатых дисков – 182 мин⁻¹ степень крошения почвы составляет 87 %, а когда значения режимных показателей равны соответственно 10,8 км/ч и 286 мин⁻¹ степень крошения почвы – 90,8 %. При повышенных режимах работы орудия комки почвы разрушаются эффективнее, поскольку при этом иглы эллипсоидных дисков перемещаются в продольно-поперечной плоскости интенсивнее. В целом, данные экспериментов удовлетворяют агротехническим требованиям, т. к. агрономически ценные фракции почвы (до 50 мм) превышают 80 % [26].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Разработан и изготовлен опытный образец орудия с рациональными параметрами: диаметр спирально-винтового рабочего органа – 0,47 м; угол наклона

витка винтовой спирали – $13,7^\circ$; количество витков винтовой спирали – 5; количество навивок спирали – 2; количество винтовых квадратных прутков – 4; угол наклона образующей поверхности винтовой спирали (образующей геликоида) к поверхности почвы – 30° ; диаметр эллипсовидных игольчатых дисков – 0,4 м; количество эллипсовидных игольчатых дисков в секции – 10 шт.; количество игл на диске – 16 шт.; угол наклона ступицы игольчатых дисков к оси вращения – 65° ; шаг расстановки игольчатых дисков – 0,18 м; ширина захвата – 1,8 м;

2. Реализация плана многофакторного эксперимента позволила получить статистически значимую математическую модель, которая описывает влияние факторов a , V_e , $n_{иг}$ на тяговое сопротивление опытного образца орудия. Установлено, что рациональными параметрами, обеспечивающими минимальное тяговое сопротивление агрегата, являются: глубина обработки $a = 0,06$ м, скорость движения агрегата $V_e = 6,9$ км/ч, частота вращения эллипсовидных игольчатых дисков $n_{иг} = 182$ мин⁻¹;

4 ТЕХНИКО - ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ОРУДИЯ

4.1 Методика расчёта технико-экономической эффективности опытного образца орудия

Расчёт технико-экономической эффективности опытного образца орудия проводится по известной методике [21, 24, 62].

4.2 Результаты расчёта технико-экономической эффективности опытного образца орудия

Для обеспечения сопоставимости результатов технико-экономической эффективности ротационного почвообрабатывающего орудия необходимо правильно выбирать базу для его сравнения.

На всех стадиях проектирования для сравнения, как правило, принимаются такие почвообрабатывающие орудия, которые в совокупности выполняют те же технологические операции. Однако анализ показал, что ротационные орудия для предпосевной обработки почвы с коаксиальным расположением рабочих органов в нашей стране и за рубежом серийно не выпускаются, существуют лишь отдельные отечественные опытные образцы.

После детального изучения различных вариантов за базу для сравнения технико-экономической эффективности принят опытный образец ротационного орудия для предпосевной обработки почвы с коаксиально расположенными рабочими органами конструкции Южно-Уральского ГАУ (ЮУрГАУ) (см. рисунок 1.6). Техничко-эксплуатационные параметры данного орудия взяты из диссертационной работы [112]. Исходные расчётные данные базового и предлагаемого вариантов исполнения опытных образцов представлены в таблице 4.1.

При расчёте эксплуатационной производительности предлагаемого почвообрабатывающего орудия за основу взяты следующие параметры: рабочая ширина захвата – 3,6 м, а поступательная скорость агрегата – 10,8 км/ч.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчёта технико-экономической эффективности

№ п/п	Показатели	Существующий вариант (база)	Предлагаемый вариант
1	Состав агрегата: трактор орудие	МТЗ – 82 опытный образец конструкции ЮУрГАУ	МТЗ – 82 опытный образец конструкции КГАУ
2	Балансовая стоимость, тыс. руб. трактора орудия	1700 170	1700 172
3	Мощность двигателя трактора, л. с. / кВт	81 / 60	81 / 60
4	Масса трактора, кг	3770	3770
5	Масса орудия, кг	875	920
6	Эксплуатационная производительность орудия, га /ч	2,3	2,6
7	Нормативная годовая загрузка, ч трактора орудия	850 240	850 240
8	Удельный расход дизтоплива при обработке почвы, кг /га	9,5	9,5
9	Удельный расход дизтоплива, г / кВт ч	230	230
10	Цена дизельного топлива, руб. / кг	44	44
11	Срок службы, лет трактора орудия	11 7	11 7
12	Количество основных рабочих, чел.	1	1
13	Тарифная ставка тракториста- машиниста, руб /ч	133	133
14	Амортизационные отчисления на реновацию, % трактора орудия	9,1 14,2	9,1 14,2
15	Отчисления на техническое обслуживание и ремонт, % трактора орудия	22 14	22 14
16	Отчисления на социальные нужды, %	26	26

Результаты расчёта представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчёта технико-экономической эффективности

№ п/п	Показатели	Существующий вариант	Предлагаемый вариант
1	Затраты на оплату труда рабочих, тыс. руб.	111,0	111,0
2	Затраты на амортизацию, тыс. руб. трактора орудия	154,7 24,1	154,7 24,4
3	Затраты на техническое обслуживание и ремонт, тыс. руб. трактора орудия	374,0 23,8	374,0 24,0
4	Затраты на дизтопливо и моторные масла, тыс. руб.	235,3	235,3
5	Накладные расходы, тыс. руб.	83,2	83,2
6	Прямые эксплуатационные затраты, тыс. руб.	1006,1	1006,6
7	Приведенные затраты, руб./га	2331,0	2112,6
8	Годовой экономический эффект, тыс. руб.	-	136,2
9	Срок окупаемости, год	-	1,26
10	Металлоёмкость процесса, кг /га	0,84	0,75
11	Трудоёмкость процесса, чел. ч /га	0,43	0,38
12	Фондоёмкость процесса, руб./га	323,9	288,2
13	Энергоёмкость процесса, кВт·ч /га	26,0	23,0

Расчет показал, что в результате снижения эксплуатационных расходов годовой экономический эффект составит 136,2 тыс. рублей. Срок окупаемости капитальных вложений 1,26 года. Энергоёмкость технологического процесса снижается на 12 %, а фондоёмкость – на 11 %.

4.3 Результаты расчёта энергетической эффективности опытного образца орудия

Сравнительная энергетическая оценка опытного образца орудия проводится дифференцированно по отдельным составляющим энергетических затрат по известной методике [20, 63, 64].

Исходные расчётные данные представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные расчётные данные энергетической эффективности

№ п/п	Показатели	Существующий вариант	Предлагаемый вариант
1	Состав агрегата: трактор орудие	МТЗ – 82 опытный образец ЮУрГАУ	МТЗ – 82 опытный образец КГАУ
2	Эксплуатационная производительность орудия, га/ч	2,3	2,6
3	Удельный расход дизтоплива, кг /га	9,5	9,5
4	Энергосодержание дизтоплива, МДж /кг	42,7	42,7
5	Количество основных рабочих, чел	1	1
6	Энергетический эквивалент живого труда, МДж /ч	1,26	1,26
7	Масса трактора, кг	3770	3770
8	Масса орудия, кг	875	920
9	Энергетический эквивалент трактора, МДж /кг	120	120
10	Энергетический эквивалент почвообрабатывающего орудия, МДж /кг	104	104
11	Годовая загрузка трактора, ч	850	850
12	Годовая загрузка орудия, ч	240	240
13	Амортизационные отчисления на реновацию трактора, %	9,1	9,1
14	Амортизационные отчисления на реновацию орудия, %	14,2	14,2
15	Отчисления на техническое обслуживание и ремонт трактора, %	22	22
16	Отчисления на техническое обслуживание и ремонт орудия, %	14	14

Результаты расчёта энергетической эффективности опытного образца орудия, который проведён дифференцированно по отдельным энергетическим затратам представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчёта энергетической эффективности

№ п/п	Показатели	Существующий вариант	Предлагаемый вариант
1	Прямые энергетические затраты, МДж/га	176,3	156,0
2	Энергоёмкость трактора, МДж/га	71,9	63,6
3	Энергоёмкость орудия, МДж/га	46,4	43,2
4	Энергетические затраты живого труда, МДж/га	0,54	0,48
5	Полные энергетические затраты агрегата, МДж/га	295,1	263,2
6	Коэффициенты энергетических затрат:		
	по прямым энергетическим затратам	-	0,88
	по энергоёмкости трактора	-	0,88
	по энергоёмкости орудия	-	0,93
	по затратам живого труда	-	0,88
7	Уровень интенсификации прямых энергетических затрат, %	-	12
8	Уровень интенсификации энергоёмкости, %		
	трактора	-	12
	орудия	-	7
9	Уровень интенсификации живого труда, %	-	12

Расчёт показывает, что полные энергетические затраты при использовании опытного образца орудия снижаются на 11 %. Уровень интенсификации технологической операции составит: по прямым энергетическим затратам – 12 %, по энергоёмкости трактора – 12 %, по энергоёмкости орудия – 7 %, а по затратам живого труда – 12 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в диссертации результаты теоретических и экспериментальных исследований, общие рекомендации по предпосевной обработке почвы могут найти применение в проектно-конструкторских организациях при создании ротационных почвообрабатывающих орудий нового поколения.

1. Выявлено перспективное направление разработки ротационных почвообрабатывающих орудий нового поколения, заключающееся в коаксиальном размещении на раме спирально-винтового рабочего органа геликоидального типа и эллипсоидных игольчатых дисков особой конструкции (Новизна технического решения подтверждена патентом РФ на полезную модель № 195364).

2. Аналитическим способом определены рациональные значения основных параметров спирально-винтового рабочего органа: диаметр $D_{\text{св}} = 0,408 - 0,544$ м, угол наклона образующей поверхности спирали (геликоида) к поверхности почвы $\delta > 19^\circ - 39^\circ$, угол наклона витка спирали $\varepsilon = 10^\circ - 25^\circ$, количества витков $n_{\text{вит}} = 5$, количество навивок $n_{\text{нав}} = 2 - 4$, шаг $S_{\text{св}} = 0,36$ м, количество винтовых квадратных прутков $n_{\text{прут}} = 4 - 8$. Определены также рациональные значения основных параметров эллипсоидных игольчатых дисков: диаметр $D_{\text{иг}} = 0,390 - 0,410$ м, угол наклона ступицы диска к оси вращения $\alpha = 60^\circ - 70^\circ$, показатель кинематического режима $\lambda = 2$, количество игл на диске $k_{\text{игл}} = 16$, расстояние между дисками по оси секции $l_{\text{д}} = 0,160 - 0,180$ м, количество дисков в секции $k_{\text{д}} = 10$. Получено аналитическое выражение для определения длины игл по всему периметру эллипсоидного диска. Выявлено, что длина $l_{\text{игл}}$ игл меняется по синусоидальному закону в пределах $0,1372 - 0,1503$ м. Получены теоретические зависимости для определения угла наклона игл к оси вращения. Расчёт выявил, что первая игла наклонена к оси вращения под минимальным углом $j_{\text{min}} = 65^\circ$, пятая и тринадцатая иглы наклонены к оси вращения под углом 90° , девятая игла наклонена к оси вращения под максимальным углом $j_{\text{max}} = 115^\circ$. Получены также теоретические зависимости для определения угла закрепления игл на ступице. Выявлено, что каждая игла закрепляется на ступице диска под своим углом β наклона, равном в

пределах $29,0^\circ - 32,6^\circ$. Из условия прочности иглы на изгиб определено и обосновано рациональное значение диаметра иглы $d = 0,010$ м. Разработаны теоретические предпосылки для определения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия.

3. Разработаны программа и методика проведения экспериментальных исследований в полевых условиях. Для реализации программы проведения экспериментальных исследований разработан и изготовлен опытный образец ротационного почвообрабатывающего орудия с рациональными параметрами: $D_{св} = 0,47$ м; $S_{св} = 0,36$ м; $\varepsilon = 13,7^\circ$; $n_{вит} = 5$; $n_{нав} = 2$; $n_{прут} = 4$; $\delta = 30^\circ$; $D_{иг} = 0,4$ м; $\alpha = 65^\circ$; $\lambda = 2$; $k_d = 10$ шт.; $k_{игл} = 16$ шт.; $l_d = 0,18$ м; угол установки дисков на валу друг относительно друга – 20° ; ширина захвата модуля – $1,8$ м.

4. Реализация плана многофакторного эксперимента позволила получить статистически значимую математическую модель, которая описывает влияние факторов на тяговое сопротивление ротационного почвообрабатывающего орудия. Установлено, что рациональными параметрами, обеспечивающими минимальное тяговое сопротивление агрегата, являются: глубина обработки $a = 0,06$ м, скорость движения агрегата $V_e = 6,9$ км/ч, частота вращения игольчатых дисков $n_{иг} = 182$ мин⁻¹. Экспериментальные исследования также показали, что глубина обработки почвы отличается от установленных значений в допустимых пределах, гребнистость обработанной поверхности $\Gamma_p = 15,2 - 21,8$ мм $< 30 - 40$ мм, а степень крошения почвы $K_p = 87 - 90,8\% > 80\%$.

5. Годовой экономический эффект от использования предлагаемого ротационного почвообрабатывающего орудия составит $136,2$ тыс. руб. Срок окупаемости капитальных вложений – $1,26$ года. Полные энергетические затраты на проведение обработки почвы снизятся на 11% . Уровень интенсификации технологической операции по энергоёмкости орудия составит 7% .

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Дальнейшая разработка темы направлена на повышение эффективности работы орудия путём совершенствования вариантов коаксиальной компоновки рабочих органов, а также установки их под углом к направлению движения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D_{\text{св}}$	– диаметр спирально-винтового рабочего органа, м;
a	– глубина обработки почвы, м;
$V_{\text{е(св)}}$	– скорость поступательного движения орудия, км /ч;
φ	– угол поворота рабочего органа, рад;
$n_{\text{св}}$	– частота вращения винтовой спирали, мин ⁻¹ ;
$\omega_{\text{св}}$	– угловая скорость вращения винтовой спирали, с ⁻¹ ;
ε	– угол наклона витка винтовой спирали, град;
$n_{\text{вит}}$	– количества витков спирали;
$b_{\text{пол}}$	– ширина спиральной ленты, м.;
$n_{\text{прут}}$	– количество винтовых прутков;
$n_{\text{нав}}$	– количество навивки спирали;
$S_{\text{св}}$	– шаг спирали, м;
$L_{\text{св}}$	– общая длина спирали, м;
δ	– угол наклона образующей поверхности спирали, град;
l_p	– длина рабочего участка режущей кромки, м;
$D_{\text{иг}}$	– диаметр эллипсовидного игольчатого диска, м;
d	– диаметр иглы, м;
$a_{\text{мл}}$	– глубина обработки (мульчирования) почвы, м;
$V_{\text{е(иг)}}$	– скорость поступательного движения диска, км /ч;
$\omega_{\text{иг}}$	– угловая скорость вращения игольчатого диска, с ⁻¹ ;
λ	– показатель кинематического режима работы;
$k_{\text{игл}}$	– количество игл на диске;
J	– интервал между иглами, м;
α	– угол наклона ступицы диска к оси вращения, град;
β	– угол установки игл на ступице по периметру диска, град;
$l_{\text{игл}}$	– длина игл по периметру диска, м;
j	– угол наклона игл к оси вращения, град;

j_p	– угол начала резания почвы режущими кромками игл, град;
$F_{стр}$	– площадь бокового сечения почвенной стружки, м ² ;
k_d	– количество эллипсовидных дисков в секции;
$\varphi_{тр}$	– угол трения скольжения почвы, град;
i	– угол заточки иглы, град;
$\beta_{иг}$	– угол расстановки дисков на валу секции, град;
A	– амплитуда движения конечных точек иглы, м;
l_d	– шаг расстановки дисков на валу секции, м;
анг.	– английский;
проф.	– профессор;
а. с.	– авторское свидетельство;
дис.	– диссертация;
автореф.	– автореферат;
канд.	– кандидат;
техн.	– технический;
д-р.	– доктор;
г.	– год;
с.	– страница;
опубл.	– опубликовано;
рад.	– радиан;
град.	– градус;
бюлл.	– бюллетень;
Б.И.	– бюллетень изобретений;
ГАУ	– Государственный аграрный университет;
ГСХА	– Государственная сельскохозяйственная академия;
РГАЗУ	– Российский государственный аграрный заочный университет;
ГЛТА	– Государственная лесотехническая академия;
АПК	– агропромышленный комплекс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 801780 СССР, А01D 43/12. Жатка / Н.Г. Энвальд, Х.С. Гайнанов, Ш.Р. Галиуллин, Р.Ш. Марданов, (СССР); Оpubл. 07.02.1981, Б. И. № 5.
2. А. с. № 1438637 СССР, МПК А01В 29/04. Почвообрабатывающее орудие / Н.С. Кабаков, Н.Ю. Матяшин, Ю.И. Матяшин, (СССР); Оpubл. 23.11.1988, Бюлл. № 43.
3. А. с. № 1435173 СССР, А01В 29/04. Почвообрабатывающее орудие / А.Е. Бенкендорф, А.И. Дерепаскин, (СССР); Оpubл. 07.11.1988, Б. И. № 41.
4. Алиакберов, И.И. Обоснование параметров эллипсовидного игольчатого диска почвообрабатывающего орудия / И.И. Алиакберов, С.М. Яхин, Л.М. Нуриев // Вестник Казанского ГАУ, 2021. – № 2(62). – С. 65-69.
5. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя, том 1 / В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
6. Абдрахманов, Р.К. Машины и орудия для междурядной обработки почвы (конструкция, теория, расчёт, эксплуатация) / Р.К. Абдрахманов. – Казань: Издательство Казанского государственного университета, 2001. – 148с.
7. Акимов, А.П. Повышение эффективности работы ротационных рабочих органов и колёсных движителей мобильных машин в системе «Движители – опорная поверхность»: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / А.П. Акимов. – Чебоксары: Чувашская ГСХА, 2005. – 487 с.
8. Аушев, М.Х. Параметры и режимы работы комбинированного почвообрабатывающего агрегата для предпосевной обработки почвы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.Х. Аушев. – Нальчик, 2018. – 141 с.
9. Бартенев, И.М. Расчёт и проектирование лесохозяйственных машин / И.М. Бартенев. – Воронеж: Воронежская ГЛТА, 2010. – 339 с.
10. Бледных, В.В. Основные закономерности силового взаимодействия трёхгранного клина с почвой / В.В. Бледных // Достижения науки и техники АПК, 2008. – С. 33-36.
11. Белокопытов, А.В. Обоснование рациональных параметров рабочих элементов игольчатых рабочих органов для сплошной обработки почвы в услови-

ях юга Украины: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Белокопытов. – Мелитополь, 1998. – 23 с.

12. Беляков, В.М. Таблицы эллиптических интегралов / В.М. Беляков, Р.И. Кравцова, М.Г. Раппопорт. – М: Издательство АН СССР, 1962. – 656 с.

13. Белокопытов, О.В. Исследования работы игольчатых рабочих органов, установленных под острым углом атаки, для обработки пропашных культур / О.В. Белокопытов, С.М. Саньков, Г.А. Рябцев // Научный вестник Таврийского государственного агротехнологического университета, 2018. – Выпуск 5. – С. 7-29.

14. Валиев, А.Р. Повышение эффективности обработки почвы в условиях Среднего Поволжья путём совершенствования машин с ротационными рабочими органами: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / А.Р. Валиев. – Казань: Казанский ГАУ, 2018. – 472 с.

15. Голубев, Д.А. Обоснование параметров и режимов работы комбинированной бороны для предпосевной обработки почвы под мелкосемянные культуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Д.А. Голубев. – М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2010. – 24 с.

16. Голубев, В.В. Совершенствование технологических процессов и технических средств для предпосевной обработки почвы, посева льна и других мелкосемянных культур: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / В.В. Голубев. – М.: МГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2017. – 421 с.

17. Гайнутдинов, Р.Х. Обоснование параметров и разработка ротационного орудия с эллипсоидными дисками для поверхностной обработки почвы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Р.Х. Гайнутдинов. – Казань: КГАУ, 2019. – 146 с.

18. Горячкин, В.П. Собрание сочинений / В.П. Горячкин // Том 3. – М.: Колос, 1968. – 360 с.

19. Габаев, А.Х. Конструктивно-технические решения повышения эффективности работы сеялки в условиях повышенной влажности: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. Х. Габаев. – Нальчик: КБГАУ, 2017 – 143 с.

20. ГОСТ Р 52777 –2007. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. М.: Стандартинформ, 2008. – 11 с.
21. ГОСТ 23728–88, ГОСТ 23730 – 88 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – М.: Стандартинформ, 1988. – 26 с.
22. ГОСТ 16265 – 89 «Земледелие. Термины и определения». – М.: Стандартинформ, 1990. – 23 с.
23. ГОСТ 20915 – 2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. – М. Стандартинформ, 2013. – 27с.
24. ГОСТ 23728–88, ГОСТ 23730–88 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 26 с.
25. ГОСТ 33687 – 2015 Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний (Переиздание). – М.: Стандартинформ, 2020. – 41 с.
26. ГОСТ 26244 – 84 Обработка почвы предпосевная. Требования к качеству и методы определения. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 4 с.
27. ГОСТ 24057 – 80 Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно – технологической оценки на этапе испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 14 с.
28. ГОСТ 33687 – 2015 Машины и орудия для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2016. – 14 с.
29. Даценко, Н.В. Исследование процессов работы зубовых приспособлений для обработки почвы на посевах пропашных культур: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н.В. Даценко. – Харьков: Хар ИМиЭСХ, 1967. – 23 с.
30. Дружинский, И.А. Сложные поверхности / И.А. Дружинский. – Л: Машиностроение, 1985. – 263 с.
31. Ермолко, Е.В. Разработка и обоснование параметров рабочего органа геликоидального типа для поверхностной обработки почв: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Е.В. Ермолко. – Рязань: Рязанский СХИ, 1989. – 24 с.
32. Желиговский, В.А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов / В.А. Желиговский. – Тбилиси: Грузинский СХИ, 1960. – 146 с.

33. Зиязетдинов, Р.Ф. Исследование процессов работы агрегатов с игольчатыми дисками на обработке сельскохозяйственных культур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Р.Ф. Зиязетдинов. – Уфа: БСХИ, 1966. – 26 с.
34. Избасарова, З.И. Обоснование конструктивно-технологических и режимных параметров спирального пневматического катка для уплотнения почв повышенной влажности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / З.И. Избасарова. – Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2009. – 20 с.
35. Козырев, Б.М. Почвообрабатывающие машины с коноидальными ротационными рабочими органами / Б.М. Козырев. – Казань: КГУ, 2001. – 328 с.
36. Канарёв, Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия / Ф.М. Канарёв. – М.: Машиностроение, 1983. – 142 с.
37. Казаков, В.И. Кинематика и параметры процесса качения ротационных рабочих органов культиватора для питомника / В.И. Казаков, И.В. Казаков // Лесотехнический журнал, 2016. – № 3. – С. 156-161.
38. Карпуша, П.П. Обоснование некоторых параметров и оценочные показатели работы игольчатых дисков, применяемых для обработки защитных зон рядков пропашных культур / П.П. Карпуша, Н.В. Даценко // Республиканский межведомственный сборник. – Киев, 1967. – С. 51-61.
39. Капустин, А.Н. Основы теории и расчета машин для основной и поверхностной обработки почв, посевных машин и машин для внесения удобрений / А.Н. Капустин. – Томск: Томский политехнический университет, 2013. – 134 с.
40. Кайванов, С.Д. Параметры ресурсосберегающего рабочего органа культиватора для предпосевной обработки почвы под пропашные культуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.Д. Кайванов. – Ставрополь: Ставропольский ГАУ, 2018. – 24 с.
41. Абдрахманов, Р.К. Комбинированный стерневой культиватор для минимальной обработки почвы / Р.К. Абдрахманов, Р.Г. Юнусов, Г.Г. Булгариев, Г.В. Пикмуллин // ИНЭКА, Чистополь, 2009. – С. 26-28.
42. Кузьмин, М.В. Нетрадиционные рабочие органы для технико-технологической модернизации сельскохозяйственного производства: автореф.

дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / М.В. Кузьмин. – М.: ФГОУ ВПО РГАЗУ, 2009. – 24 с.

43. Кислов, А.А. Обоснование параметров и режимов работы дискового почвообрабатывающего орудия с игольчатыми рабочими органами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Кислов. – Благовещенск: Дальневосточный ГАУ, 2006. – 20 с.

44. Конищев, А.А. Обоснование параметров рабочих органов игольчатой бороны для обработки почвы на стерневых фонах: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Конищев. – пос. Шортанды: ВНИИЗХ, 1983. – 219 с.

45. Кислов, А.А. Ротационное орудие с игольчатыми рабочими органами для ухода за посевами сельскохозяйственных культур / А.А. Кислов, А.Ф. Кислов // Вестник КрасГАУ, 2007. – № 5. – С. 150-152.

46. Яхин, С.М. Кинематика игольчатого эллипсоидного диска ротационного почвообрабатывающего орудия / С.М. Яхин, И.И. Алиакберов, Л.М. Нуриев, Ф.Ф. Яруллин // Техника и оборудование для села, 2020. – № 2 (272). – С. 12-15.

47. Нуриев, Л.М. Кинематический анализ и обоснование параметров спирально-винтового рабочего органа почвообрабатывающей машины / Л.М. Нуриев, Ф.Ф. Яруллин, С.М. Яхин, И.И. Алиакберов, Р.К. Хусаинов // Вестник Казанского ГАУ, 2020. – № 2(58). – С. 21-26.

48. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 138 с.

49. Курач, А.А. Результаты исследования работы ротационных рабочих органов с активным приводом / А.А. Курач, М.А. Амантаев // Вестник Курганской ГСХА, 2013. – № 4. – С. 77-79.

50. Коротких, Э.В. Сельскохозяйственные машины: методические указания / Э.В. Коротких, А.С. Шишлов. – Уссурийск: Приморская ГСХА, 2016. – 52 с.

51. Латыпов, Р.М. Совершенствование технологических процессов и технических средств для возделывания и уборки картофеля: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Р.М. Латыпов. – Челябинск: Челябинский ГАУ, 2010. – 43 с.

52. Лисунов, О. В. Обоснование параметров рабочих органов комбинированного орудия для предпосевной обработки почвы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / О.В. Лисунов. – Красноярск: Красноярский ГАУ, 2004. – 137 с.

53. Ли, В.В. Обоснование технологии и параметров рабочих органов сеялки для посева зерновых культур по почвенной корке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.В. Ли. – Новосибирск: Бурятская ГСХА, 2000. – 22 с.

54. Лещанкин, А.И. Теоретические основы ротационных почвообрабатывающих рабочих органов с винтовыми поверхностями / А.И. Лещанкин. – Саратов: Саратовский ГАУ, 1986. – 208 с.

55. Матяшин, Ю.И. Расчёт и проектирование ротационных почвообрабатывающих машин / Ю.И. Матяшин, И.М. Гринчук, Г.М. Егоров. – М.: Агропромиздат, 1988. – 174 с.

56. Матяшин, Ю.И. Теория сельхозмашин с ротационными рабочими органами / Ю.И. Матяшин, Н.Ю. Матяшин // Вестник Казанского ГАУ, 2009. – № 2(12). – С. 179-185.

57. Мазитов, Н.К. Теория реактивных рабочих органов почвообрабатывающих машин / Н.К. Мазитов. – Казань: Изд-во «Фэн», 2011. – 280 с.

58. Мармалюков, В.П. Исследование процесса механизации предпосевной обработки почвы катком-выравнивателем в условиях Нечернозёмной зоны: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.П. Мармалюков. – Минск, 1980. – 19 с.

59. Машенский, А.А. Обоснование кинетических параметров почвообрабатывающих фрез / Машенский А.А., Машенский Ю.А., Синкевич П.Н. // Материалы международной научно-технической конференции. – Минск: Белорусский ГАТУ. – С. 466-473.

60. Мингалимов, Р.Р. Обоснование конструктивно-технологических и эксплуатационных параметров движителя-рыхлителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Р.Р. Мингалимов. – Оренбург, 2008. – 20 с.

61. Анутов, Р.М. Механико-математическое моделирование и обоснование углов входа ротационных рабочих органов культиватора в почву / Р.М. Анутов,

В.Я. Котельников, А.А. Козявин, А.В. Котельников, Д.Е. Тищенко // Современные наукоёмкие технологии, 2012. – № 11. – С. 15-17.

62. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. – М.: Минсельхоз России, 1998. – 219 с.

63. Токарев, В.А. Методические рекомендации по топливно–энергетической оценке сельскохозяйственной техники, технологических процессов и технологий в растениеводстве / В.А. Токарев, В.Н. Бражушков и др. – М.: ВИМ. 1989. – 60 с.

64. Методика энергетического анализа технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. – М.: ВИМ. 1995. – 96 с.

65. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

66. Наумов, Л.Г. Исследование и обоснование параметров и режимов работы спиральнозубового рыхлителя-выравнивателя с автовибратором для поверхностной предпосевной обработки почвы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Л.Г. Наумов. – Казань: Казанская ГСХА, 1999. – 19 с.

67. Нуриев, Л.М. Бороны с активными спирально-винтовыми рабочими органами / Л.М. Нуриев, А.А. Камалиев, С.М. Яхин // Сельский механизатор, 2013. – № 11. – С. 10-11.

68. Нуриев, Л.М. К определению тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия / Л.М. Нуриев // Вестник Казанского ГАУ, 2021. – № 1 (65). – С. 73-76.

69. Булгариев, Г.Г. Обоснование формы и определение конструктивных параметров ротационного рыхлителя почвы агрегата / Г.Г. Булгариев, Г.В. Пикмуллин, Г.В. Бегалиев, И.Г. Галиев и др. // Вестник Казанского ГАУ, 2018. – № 3(50). – С. 73-76.

70. Хайлис, Г.А. О прокалывании почвы иглами игольчатой бороны / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев, Л.А. Талах, В.В. Шевчук // Достижения науки и техники АПК, 2014. – № 1. – С. 60-62.

71. Обоснование конструктивных параметров бесприводного ротационного рабочего органа. [Электронный ресурс]: <http://infopedia.su/14x10fo.html> (Дата обращения 21.09.2019).
72. ОСТ 10218–2001. Испытание сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки.– М.: Минсельхоз России, 2001. – 36с.
73. ОСТ 70.2.2–73. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. – М.: Союзсельхозтехника, 1974. – 23 с.
74. ОСТ 10218 – 2001 Испытание сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки.– М.: Минсельхоз России, 2001. – 36с.
75. ОСТ 70.2.2–2002. Испытание сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. – М.: Минсельхоз России, 2002. – 24 с.
76. ОСТ 70.2.15 – 73 Испытание сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. – М.: Союзсельхозтехника, 1974. – 24 с.
77. ОСТ 70.2.2 – 73 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. – М.: Союзсельхозтехника, 1974. – 23 с.
78. ОСТ 70.2.2 – 2002 Испытание сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. – М.: Минсельхоз России, 2002. – 24 с.
79. Патент № 120314 РФ, МПК А01В 29/04. Борона ротационная мульчирующая / С.М. Яхин, А.Р. Валиев, Б.Г. Зиганшин, Н.И., Семушкин, А.А. Камалиев, (РФ); Оpubл. 20.09.2012, Бюлл. № 26.
80. Панов, И.М. Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И. Ветохин. – Киев: Феникс, 2008. – 266 с.
81. Падальцин, К.Д. Снижение энергозатрат и повышение качественных показателей поверхностной обработки почвы комбинированием рабочих органов культиватора: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / К.Д. Падальцин. – Ставрополь: Ставропольский ГАУ, 2015. – 128 с.
82. Понамарев, А.В. Кинематика игольчатого диска / А.В. Понамарев // Научный журнал Кубанского ГАУ, 2014. – № 97 (03). – С.1-11.
83. Подолько, П.М. Повышение качества предпосадочной обработки под картофель применением бесприводного ротационного рабочего органа: автореф.

дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / П.М. Подолько. – Челябинск: Челябинский ГАУ, 2009. – 21 с.

84. Патент № 122229 РФ, МПК А01В 29/04. Винтовая борона-каток / С.М. Яхин, А.Р. Валиев, Б.Г. Зиганшин, Н.И. Семушкин, Л.М. Нуриев, (РФ); Оpubл. 27.11.2012, Бюлл. № 33.

85. Патент № 2128896 РФ, МПК А01В 29/04. Почвообрабатывающее орудие / Ю.И. Матяшин, Ю.В. Якимов, Л.Г. Наумов, (РФ); Оpubл. 20.04.1999.

86. Патент № 2492606 РФ, МПК А01В 29/04. Борона ротационная мульчирующая / С.М. Яхин, А.Р. Валиев, Б.Г. Зиганшин, Н.И., Семушкин, А.А. Камалиев, (РФ); Оpubл. 20.09.2013, Бюлл. № 26.

87. Патент № 2399178 РФ, МПК А01В 21/04. Ротационное почвообрабатывающее орудие / П.А. Смирнов, И.И. Максимов, М.П. Смирнов, А.В. Кудряшов, (РФ); Оpubл. 20.09.2010, Бюлл. № 26.

88. Патент № 108903 РФ, МПК А01С 5/00. Почвообрабатывающий адаптер для узкополосной обработки почвы к пропашным сеялкам / П.А. Смирнов, М.П. Смирнов, (РФ); Оpubл. 10.10.2011, Бюлл. № 28.

89. Патент № 2400034 РФ, МПК А01В 23/06. Почвообрабатывающее орудие с игольчатыми дисками/ П.А. Смирнов, М.П. Смирнов, (РФ); Оpubл. 27.09.2010, Бюлл. № 27.

90. Патент № 2197800 РФ, МПК А01В 33/02. Комбинированный рыхлитель-сепаратор / А.В. Руцкой, (РФ); Оpubл. 10.02.2003, Бюлл. № 4.

91. Патент № 2345513 РФ, МПК А01В 49/02. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат / А.Д. Кормщиков, Р.Ф. Курбанов, С.С. Храмцов, А.Ю. Шмагин, И.Д. Лукин, (РФ); Оpubл. 10.02.2009, Бюлл. № 4.

92. Патент № 2424641 РФ, МПК А01В 29/04. Ротационная борона / Д.А. Голубев, В.В. Голубев, Д.М. Рула, (РФ); Оpubл. 27.07.2011, Бюлл. № 21.

93. Патент № 2251236 РФ, МПК А01В 29/04. Противозерозионный каток-лункователь Л.Н. Буркова / Л.Н. Бурков, (РФ); Оpubл. 10.05.2005, Бюлл. № 2.

94. Патент № 2435345 РФ, Комбинированный почвообрабатывающий агрегат (борона плюс винтовой каток) / В.А. Геер, С.В. Геер, А.Б. Ильичев, М.А. Кунц, (РФ); Оpubл. 10.12.2010, Бюлл. № 34.

95. Патент № 195364 РФ, МПК А01В 49/02. Ротационное комбинированное орудие для предпосевной обработки почвы / С.М. Яхин, И.И. Алиакберов, Л.М. Нуриев, (РФ); Оpubл. 23.01.2020, Бюлл. № 3.

96. Патент № 2510165 РФ. Устройство для обработки междурядий пропашных культур / С.М. Яхин, А.Р. Валиев, Н.И. Сёмушкин, Р.Ф.Шамсутдинов, (РФ), Оpubл. 27.03.2014, Бюлл. № 9.

97. Патент № 2119734 РФ, МПК А01В 49/02. Почвообрабатывающий комбинированный агрегат / А.Ф. Жук, (РФ); Оpubл. 10.10.1998.

98. Путрин, А.С. Основы проектирования рабочих органов для рыхления почв, находящихся за пределами физически спелого состояния: дис. докт. техн. наук: 05.20.01 / А.С. Путрин. – Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2003. – 460 с.

99. Путрин, А.С. Обоснование основных конструктивных параметров и режимов работы игольчатых ротационных рабочих органов почвообрабатывающих машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.С. Путрин. – Оренбург: Оренбургский СХИ, 1986. – 252 с.

100. Рахимов, И.Р. Методика тензометрирования почвообрабатывающих машин с использованием мини ЭВМ / И.Р. Рахимов, К.А. Тарасов // Тезисы докладов научно-технической конференции. – Челябинск: ЧГАУ, 2001. – С. 14-17.

101. Радченко, Ю. Г. Способ определения тягового сопротивления сельскохозяйственных машин и орудий в условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Ю.Г. Радченко. – Новосибирск, 1984. – 216 с.

102. Яхин, С.М. Расчет валов сельскохозяйственных машин при сложном нагружении / С. М. Яхин, Б.Г. Зиганшин, А.Р. Валиев, Н.И. Сёмушкин, Л.М.Нуриев // Materialy VIII mezinárodní vědecko-praktická konference «Prední vědecké novinky – 2012». – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2012. S. 59-65.

103. Развёртка поверхности витка шнека. Технический справочник конструкторам, инженерам, технологам – [Электронный ресурс] [http:// razvitie-pu.ru](http://razvitie-pu.ru) (Дата обращения 03.03.2021).

104. Смирнов, П.А. Обоснование параметров игольчатой бороны с кинематическим соединением между эшелонированными батареями: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / П.А. Смирнов. – Чебоксары: Чувашская ГСХА, 2002. – 140 с.

105. Сохт, К.А. Дисковые бороны и лушильники / К.А. Сохт, Е.И. Трубилин, В.И. Кисилев. – Краснодар: Кубанский ГАУ, 2014. – 164 с.

106. Сагалбеков, Б.У. Параметры игольчатых ротационных органов сошниковой группы селекционной сеялки для посева зерновых по стерневому фону: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Б.У. Сагалбеков. – Новосибирск: Сибирский НИИСХ, 2013. – 20 с.

107. Смирнов, М.П. Обоснование параметров бесприводного ротационного рабочего органа почвообрабатывающего адаптера к сеялкам для пропашных культур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.П. Смирнов. – Чебоксары: Чувашская ГСХА, 2012. – 19 с.

108. Сапаров, О. Разработка технологического процесса рыхления почвы игольчатым рабочим органом и обоснование режимов работы орудия: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / О. Сапаров. – Челябинск: Челябинский СХИ, 1983. – 18 с.

109. Трубилин, Е.И. Сельскохозяйственные машины (конструкция, теория и расчёт) / Е.И. Трубилин, В.А. Абликов, И.И. Смирнов, Л.П. Соломатина, А.Н. Лютый. – Краснодар: Краснодарский ГАУ, 2008. – 200 с.

110. Босой, Е.С. Теория, конструкция и расчёт сельскохозяйственных машин / Е.С. Босой, О.В. Верняев, И.И. Смирнов, Е.Г. Султан – Шах. – М.: Машиностроение, 1978. – 568 с.

111. Эркенов, А.Н. Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров комбинированного пахотного агрегата / А.Н. Эркенов, Ю.А. Шекихачев, Л.М. Хажметов, Д.А. Гергокаев, Х.Х. Сабанчиев // Научный журнал Кубанского ГАУ, 2012. – № 77(03). – С. 325-334.

112. Теличкина, Н.А. Обоснование параметров комбинированного культиватора с тросовым и катковым рабочими органами для предпосевной обработки почвы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н.А. Теличкина. – Троицк: Южно-Уральский ГАУ, 2018. – 153 с.

113. Ветохин, В.И. Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины (монография) / В.И. Ветохин, И. М.Панов, В.А. Шмонин, В.А. Юзбашев. – Киев: «Феникс», 2009. – 263 с.

114. Булгариев, Г.Г. Уравнения движения лезвия зуба спирально-пластинчатого рабочего органа в пространстве / Г.Г. Булгариев, Г.В. Пикмуллин, Р.Г. Юнусов, Р.Р. Шириязданов // Вестник Казанского ГАУ, 2016. – № 1(39). – С. 66-69.

115. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

116. Храмцов, С.С. Разработка конструктивно-технологической схемы энергосберегающего почвозащитного орудия для основной и поверхностной обработки почвы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.С. Храмцов. – Киров: Вятская ГСХА, 2009. – 24 с.

117. Шмидт, А.Н. Характеристика работы игольчатых дисковых рабочих органов / А.Н. Шмидт, А.А. Лучинович, А.С. Союнов, Н.А. Зарипова, С.П. Прокотов, А.Ю. Головин, А.Г. Щербакова // Вестник Омского ГАУ, 2018. – № 3(31). – С. 95-102.

118. Чаткин, М.Н. Повышение эффективности функционирования комбинированных почвообрабатывающих машин с ротационными активными рабочими органами: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / М.Н. Чаткин. – Саранск: Мордовский ГУ, 2008. – 551 с.

119. Шубин, А.В. Обоснование параметров выравнивающих устройств комбинированных почвообрабатывающих агрегатов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.В. Шубин. – М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2010. – 137 с.

120. Кем, А.А. Экспериментальные исследования взаимодействия рабочего органа игольчатого диска с растительными остатками / А.А. Кем, А.П. Шевченко,

М.А. Бегунов, В.С. Коваль // Вестник Омского ГАУ, 2019. – № 1(33). – С. 134 - 141.

121. Шейченко, В.А. Экспериментальные исследования игольчатой бороны / В.А. Шейченко, Г.А. Хайлис, В.В. Шевчук, И.А. Дудников, А.С. Пушка. – Умань (Украина): Изд-во LAR LAMBERT, 2017. – 172 с.

122. Юнусов, Г.С. Совершенствование технологий и технических средств поверхностной обработки почвы: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Г.С. Юнусов. – Киров, 2005. – 44 с.

123. Юнусов, Р.Г. Обоснование параметров и разработка спирально-пластинчатого рабочего органа комбинированной почвообрабатывающей машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Р.Г. Юнусов. – Казань: Казанский ГАУ, 2019. – 194 с.

124. Якимов, Ю.В. Обоснование параметров и режимов работы конического выравнивателя-уплотнителя для предпосевной обработки почвы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ю.В. Якимов. – Казань: Казанская ГСХА, 2000. – 158 с.

125. Яхин, С.М. Совершенствование методов расчёта и повышение надёжности пружинных элементов сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.03 / С.М. Яхин. – М, 2013. – 32 с.

126. Алиакберов, И.И. Ротационное почвообрабатывающее орудие с коаксиальным расположением рабочих органов / И.И. Алиакберов, Л.М. Нуриев // Проблемы развития научного потенциала и направления его повышения: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2023. – С. 9-11.

127. Алиакберов, И.И. Результаты экспериментального определения тягового сопротивления ротационного почвообрабатывающего орудия / И.И. Алиакберов, Л.М. Нуриев // Проблемы развития научного потенциала и направления его повышения: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2023. – С. 11-14.

128. Алиакберов, И.И. Параметрические уравнения движения игольчатых дисков ротационного почвообрабатывающего орудия / И.И. Алиакберов,

Л.М. Нуриев // Система научных ценностей Российского общества: междисциплинарные исследования: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Саратов, 2023. – С. 99-101.

129. Гайнанов, Х.С. Совмещение механизированных операций в земледелии / Х.С. Гайнанов. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 32 с.

130. Сергунцов, А.С. Оптимизация процессов боронования посевов озимой пшеницы с одновременной подкормкой: дис. ... канд. техн.: 05.20.01 / А.С. Сергунцов. – Краснодар: Кубанский ГАУ, 2020. – 152 с.

131. Щукин, С.Г. Совершенствование уплотняющих ротационных рабочих органов с использованием методов моделирования процесса их взаимодействия с почвой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.Г. Щукин. – Новосибирск: Сибирский НИИМЭСХ, 1999. – 21 с.

132. Nuriev, L.M. Kinematics and parameters for spiral-helical machinery unit used for secondary tillage / L. M. Nuriev, S. M. Yakhin, I. I. Aliakberov, I. G. Galiev, S. S. Sinitsky // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 488 012051. IOP Publ. 2019. P. 1-11.

133. Borissov, B. Resistance of operating equipment and agricultural machinery during progressive and rotary motion / Bulgarian of Journal of agricultural science. 2007. No 13. P. 141-149.

134. Batirov, Z. Traction resistance of a ripper with a current distribution line / Batirov Z., Sharipov Sh., Mahmudov Y., Azizov Sh., Mamadiyrov O. // E3S Web of Conferences 264, 04050 – [Электронный ресурс]: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> (Дата обращения 21.06.2021).

135. Sakharov, R. Results of experiments to determine the traction resistance of a disk working body / Sakharov R., Gainutdinov R., Mahmutov M., Zemdikhanov M. // E3S Web of Conferences 222, 03006 – [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022203006> (Дата обращения 21.06.2021).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

«УТВЕРЖДАЮ»
 Глава КФХ ИП Вафин Р.К.
 Лаишевского района Республики
 Татарстан
 Р.К. Вафин
 14 октября 2021 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
 Ректор ФГБОУ ВО «Казанский
 ГАУ», д.т.н., доцент
 А.Р. Валиев
 14 октября 2021 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
 технологических работ

Заказчик КФХ ИП Вафин Р.К. Лаишевского района Республики Татарстан
 (наименование организации)

Вафин Радик Кадырович
 (Ф.И.О. руководителя организации)

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы
«Обоснование параметров и разработка ротационного орудия для
предпосевной обработки почвы с коаксиальным расположением рабочих
органов»,

(наименование темы, № гос. регистрации)

выполненные на кафедре общепромышленных дисциплин ФГОУ ВО
«Казанский государственный аграрный университет»

(наименование вуза, НИИ, КБ)

стоимостью 172 000 (сто семьдесят две тысячи) рублей 00 копеек,
внедрены в КФХ ИП Вафин Р.К. Лаишевского района Республики Татарстан
 (наименование предприятия, где осуществлялось внедрение)

1. Вид внедренных результатов: Техническая и технологическая
документация на изготовление ротационного орудия для предпосевной
обработки почвы с коаксиальным расположением рабочих органов

(эксплуатация (изделий, работы, технологии); производство (изделий, работы, технологии); функционирование (систем))

2. Характеристика масштаба внедрения:
единичное

(уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Форма внедрения: передача документации и использование ее в
изготовлении ротационного орудия для предпосевной обработки почвы с
коаксиальным расположением рабочих органов.

4. Методика (метод): Рекомендации, техническая
документация

Приложение Б

«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор ООО «Нармонка»
 Лаишевского района Республики
 Татарстан

 О.Г. Солягин
 «30» сентября 2021 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
 Первый проректор – проректор по научной
 и международной деятельности ФГБОУ
 ВО «Казанский ГАУ» д.т.н., профессор

 Б.Г. Зиганшин
 «30» сентября 2021 г.

АКТ

испытания опытного образца ротационного почвообрабатывающего орудия

Комиссия в составе председателя: руководителя УДЦ ИМ и ТС Казанского ГАУ, к.т.н., доцента Семушкина Н.И. и членов: директора ИМ и ТС Казанского ГАУ, д.т.н., доцента Яхина С.М., заведующего кафедрой «Общеинженерные дисциплины», к.т.н., доцента Пикмуллина Г.В., соискателя кафедры «Общеинженерные дисциплины» Нуриева Л.М., главного инженера ООО «Нармонка» Гарипова А.Ф. составили настоящий акт о том, что 29 сентября 2021 года проведены испытания опытного образца ротационного почвообрабатывающего орудия (патент РФ №195364) в полевых условиях ООО «Нармонка» Лаишевского района Республики Татарстан.

1. Испытания проведены на среднесуглинистой почве. Влажность слоя почвы 0...0,1 м составила 18,2 %, плотность – 1,13 г/см³, твёрдость почвы – 1,35 МПа.

2. На основе разработанной методики и составленной матрицы были проведены экспериментальные исследования по определению тягового сопротивления опытного образца орудия при различных значениях глубины обработки почвы, скорости поступательного движения и частоты вращения игольчатых дисков. В ходе экспериментов определены также агротехнические показатели работы: фактическая глубина обработки, гребнистость обработанной поверхности поля и степень крошения почвы при различных режимах.

3. Опытный образец ротационного почвообрабатывающего орудия технологически устойчив и показал хорошую работоспособность.

Председатель комиссии:

Руководитель УДЦ ИМ и ТС, к.т.н., доцент

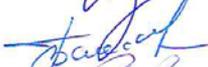
 Семушкин Н.И.

Члены:

Директор ИМ и ТС, д.т.н., доцент

 Яхин С.М.

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

 Пикмуллин Г.В.

Соискатель

 Нуриев Л.М.

Гл. инженер ООО «Нармонка»

 Гарипов А.Ф.

Приложение В

Акт об использовании результатов научно-исследовательских работ в учебном процессе

«УТВЕРЖДАЮ»

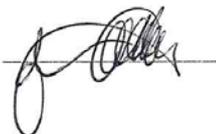
Первый проректор – проректор по научной
и международной деятельности ФГБОУ
ВО «Казанский ГАУ», д.т.н., профессор
Б.А. Зипаншин
« 05 » _____ 2021 г.

АКТ

об использовании результатов научно-исследовательских работ в учебном
процессе кафедры «Машин и оборудования в агробизнесе»

Комиссия в составе проректора по учебно-воспитательной работе ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ», к.т.н., доцента Дмитриева А.В., директора Института механизации и технического сервиса, д.т.н., доцента С.М. Яхина, заведующего кафедрой «Машин и оборудования в агробизнесе», к.т.н., доцента Д.Т. Халиуллина составила настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательских работ соискателя кафедры «Общеинженерные дисциплины» Нуриева Л.М. используются студентами в учебном процессе, обучающимися по направлениям подготовки: 35.03.06 - «Агроинженерия», а также при выполнении лабораторных работ по дисциплинам: «Сельскохозяйственные машины», «Технические средства в АПК», «Транспортно-технологические машины в сельском хозяйстве» и «Механизация растениеводства».

Проректор по учебно-воспитательной
работе ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ»,
к.т.н., доцент


_____ А.В. Дмитриев

Директор Института механизации и
технического сервиса ФГБОУ ВО
«Казанский ГАУ», д.т.н., доцент


_____ С.М. Яхин

Заведующий кафедрой «Машины и
оборудование в агробизнесе», к.т.н.,
доцент


_____ Д.Т. Халиуллин

Приложение Г

Результаты расчёта конструктивных и технологических параметров эллипсоидного игольчатого диска

Таблица Г1 – Результаты расчёта углов расположения игл на профильной плоскости и плоскости диска, полярных радиусов диска и ступицы и длины игл эллипсоидного диска по периметру

Номер иглы	$\varphi_{\text{игл}}^{\text{H}}$, градус	$\varphi_{\text{игл}}^{\text{K}}$, градус	$\psi_{\text{игл}}^{\text{H}}$, градус	$\psi_{\text{игл}}^{\text{K}}$, градус	$\rho_{\text{игл}}^{\text{K}}$, м	$\rho_{\text{ст}}^{\text{H}}$, м	$\xi_2^{\text{ист}}$, градус	$l_{\text{игл}}$, м
1	0	20	0	19,14	0,2181	0,0772	19,14	0,1471
2	22,5	42,5	20,56	39,71	0,2115	0,0762	19,15	0,1417
3	45	65	42,18	62,77	0,2038	0,0737	20,59	0,1372
4	67,5	87,5	65,45	87,17	0,2000	0,0711	21,71	0,1385
5	90	110	90	111,89	0,2025	0,0700	21,89	0,1400
6	112,5	132,5	114,55	135,32	0,2093	0,0711	20,77	0,1454
7	135	155	137,82	157,09	0,2171	0,0737	19,27	0,1494
8	157,5	177,5	159,44	177,74	0,2206	0,0762	18,30	0,1503
9	180	200	180	198,25	0,2181	0,0772	19,14	0,1471
10	202,5	222,5	200,56	219,71	0,2115	0,0762	19,15	0,1417
11	225	245	222,18	242,77	0,2038	0,0737	20,59	0,1372
12	247,5	267,5	245,45	267,17	0,2000	0,0711	21,71	0,1385
13	270	290	270	291,89	0,2025	0,0700	21,89	0,1400
14	292,5	312,5	294,55	315,32	0,2093	0,0711	20,77	0,1454
15	315	335	317,82	337,09	0,2171	0,0737	19,27	0,1494
16	337,5	357,5	339,44	357,74	0,2206	0,0762	18,30	0,1503

Таблица Г2 – Результаты расчёта технологических параметров

Номер иглы	$\varphi_{\text{игл}}^{\text{H}}$, градус	$\psi_{\text{игл}}^{\text{H}}$, градус	$\rho_{\text{игл}}^{\text{K}}$, м	$\xi_{2}^{\text{ист}}$, градус	$l_{\text{игл}}$, м	j , градус	β , градус	$\xi_{3}^{\text{ист}}$, градус	j_{p} , градус
1	0	0	0,2181	19,14	0,1471	65	29,07	16,81	39,10
2	22,5	20,56	0,2115	19,15	0,1417	66,64	29,31	15,40	40,72
3	45	42,18	0,2038	20,59	0,1372	71,71	31,48	13,64	42,06
4	67,5	65,45	0,2000	21,71	0,1385	79,80	32,28	13,94	42,91
5	90	90	0,2025	21,89	0,1400	90	32,63	15,91	41,45
6	112,5	114,55	0,2093	20,77	0,1454	100,20	30,69	18,30	40,22
7	135	137,82	0,2171	19,27	0,1494	108,29	28,65	19,82	39,01
8	157,5	159,44	0,2206	18,30	0,1503	113,36	27,43	19,52	38,79
9	180	180	0,2181	19,14	0,1471	115,02	29,07	16,81	39,10
10	202,5	200,56	0,2115	19,15	0,1417	113,36	29,31	15,40	40,72
11	225	222,18	0,2038	20,59	0,1372	108,29	31,48	13,64	42,06
12	247,5	245,45	0,2000	21,71	0,1385	100,20	32,28	13,94	42,91
13	270	270	0,2025	21,89	0,1400	90	32,63	15,91	41,45
14	292,5	294,55	0,2093	20,77	0,1454	79,80	30,69	18,30	40,22
15	315	317,82	0,2171	19,27	0,1494	71,71	28,65	19,82	39,01
16	337,5	339,44	0,2206	18,30	0,1503	66,64	27,43	19,52	38,79

Приложение Д

Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации

федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования



Рэсэй Федерациясенен авыл
хужалыгы министрлыгы

югары белем биру
федераль дэүләт бюджет
учреждениясе

**«Казанский государственный
аграрный университет»**
(ФГБОУ ВО Казанский ГАУ)

**«Казан дәүләт аграр
университеты»**
(Казан ДАУ)

ул.К.Маркса, 65, г.Казань, 420015, тел. (843) 236-65-22, 567-45-00 факс (843) 236-66-51, e-mail: info@kazgau.com, www.kazgau.ru
ОКПО 00493635, ОГРН 1031622501789, ИНН 1655018875, КПП 165501001

№
на № от 07.12.2021

СПРАВКА

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» удостоверяет, что результаты научно-исследовательской работы Яхина С.М., Нуриева Л.М. по разработке перспективных ротационных почвообрабатывающих орудий со спирально-винтовыми рабочими органами, выполненной на кафедре общеинженерных дисциплин, экспонировались в 2017 году на 20^{ой} Международной специализированной выставке «АГРОКОМПЛЕКС: Интерагро. Анимед. Фермер Поволжья-2017», которая проводилась в г. Казани в выставочном центре ОАО «Казанская ярмарка».

Первый проректор - проректор
по научной и международной
деятельности, д.т.н., профессор



Б.Г. Зиганшин

Приложение Е

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО
ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Казанский ГАУ)



РӘСӘЙ ФЕДЕРАЦИЯСЕНЕҢ АВЫЛ
ХУЖАЛЫҖЫ МИНИСТРЛЫҖЫ
югары белем бирү федераль дәүләт
бюджет мәғариф учреждениесе
«КАЗАН ДӘУЛӘТ АГРАР
УНИВЕРСИТЕТЫ»
(ЮББ ФДБМУ Казан ДАУ)

420015, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 65, тел. +7 (843) 567-45-00, факс +7 (843) 567-45-99,
E-mail: info@kazgau.com, Web-сайт: www.kazgau.ru
ОКПО 00493635, ОГРН 1031622501789, ИНН 1655018875, КПП 165501001

03.11.2022г. № 01-1309/1
На № _____ от _____

СПРАВКА

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» удостоверяет, что результаты научно-исследовательской работы Яхина С.М., Нуриева Л.М. по теме «Обоснование параметров и разработка ротационного орудия с коаксиальным расположением рабочих органов для предпосевной обработки почвы», выполненной на кафедре общепромышленных дисциплин ФГБОУ ВО Казанский ГАУ, экспонировалась в 2022 г. на международной агропромышленной выставке «АГРОВОЛГА-2022», которая проводилась в г. Казани в выставочном центре МВЦ «Казань Экспо».

Первый проректор - проректор
по научной работе и цифровой трансформации
д.т.н., профессор



Б.Г. Зиганшин

Приложение Ж

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 195364

**РОТАЦИОННОЕ КОМБИНИРОВАННОЕ ОРУДИЕ ДЛЯ
ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный аграрный университет"* (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ) (RU)

Авторы: *Яхин Сергей Мирбатович (RU), Алиакберов Ильфат Ирфанович (RU), Нуриев Ленар Мидхатович (RU)*

Заявка № 2019136979

Приоритет полезной модели 18 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 23 января 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 18 ноября 2029 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**195 364** (13) **U1**(51) МПК
A01B 49/00 (2006.01)
A01B 49/02 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**(52) СПК
A01B 49/00 (2019.08); A01B 49/02 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019136979, 18.11.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.11.2019Дата регистрации:
23.01.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 18.11.2019

(45) Опубликовано: 23.01.2020 Бюл. № 3

Адрес для переписки:
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65,
ФГБОУ ВО Казанский ГАУ, отдел научных
исследований и инноваций

(72) Автор(ы):

Яхин Сергей Мирбатович (RU),
Алиакберов Ильфат Ирфанович (RU),
Нурiev Ленар Мидхатович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Казанский государственный
аграрный университет" (ФГБОУ ВО
Казанский ГАУ) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2492606 C1, 20.09.2013. RU
2345513 C2, 10.02.2009. RU 30484 U1, 10.07.2003.
KZ 26976 A4, 14.06.2013.**(54) РОТАЦИОННОЕ КОМБИНИРОВАННОЕ ОРУДИЕ ДЛЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ
ПОЧВЫ**

(57) Формула полезной модели

1. Ротационное комбинированное орудие для предпосевной обработки почвы, содержащее раму, коаксиально установленные на валу внешний и внутренний рабочие органы и привод, отличающееся тем, что внешний рабочий орган выполнен пассивным с левой и правой навивкой симметрично относительно соединительного кольца, а внутренний рабочий орган - в виде игольчатых эллипсоидных дисков, снабженных приводом, причем конструктивные параметры эллипсоидных дисков определяются по формулам

$$a=D/(2 \sin \alpha), b=D/2,$$

где a , b - большая и малая полуоси эллипсов,

D - диаметры дисков в проекции на профильную плоскость,

α - угол закрепления дисков на валу.

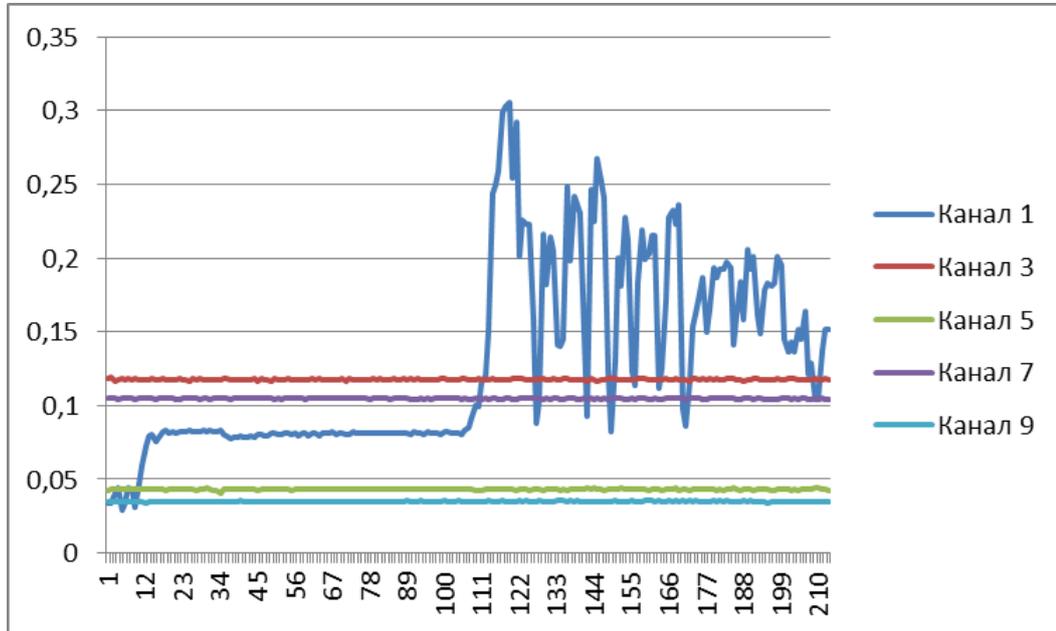
2. Ротационное комбинированное орудие по п. 1, отличающееся тем, что витки спирали соединены между собой спиральными квадратными прутками с левой и правой навивкой симметрично относительно соединительного кольца.

3. Ротационное комбинированное орудие по п. 1, отличающееся тем, что иглы эллипсоидных дисков установлены на обойме с наклоном назад на угол $\beta > \varphi_{тр}$, где

Приложение 3

К определению тягового сопротивления

1. Силовая диаграмма тягового сопротивления почвообрабатывающего орудия



2. Фрагмент численных значений сигналов по каналам

Канал 1	Канал 3	Канал 5	Канал 7	Канал 9
0,034	0,118	0,042	0,105	0,035
0,034	0,119	0,043	0,105	0,035
0,04	0,116	0,043	0,105	0,035
0,044	0,117	0,043	0,104	0,035
0,029	0,118	0,043	0,105	0,035
0,034	0,117	0,043	0,105	0,035
0,044	0,118	0,043	0,105	0,035
0,043	0,117	0,043	0,105	0,035
0,031	0,118	0,043	0,104	0,035
0,047	0,117	0,043	0,105	0,035
0,059	0,117	0,043	0,105	0,035
0,073	0,117	0,043	0,105	0,034
0,079	0,117	0,043	0,105	0,035
0,08	0,118	0,043	0,105	0,035
0,076	0,117	0,043	0,104	0,035
0,078	0,117	0,043	0,105	0,035
0,082	0,118	0,043	0,105	0,035
0,083	0,117	0,042	0,105	0,035