

На правах рукописи



ФЕДОРОВ ДЕНИС ИГОРЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
РОТАЦИОННОГО ПЛУГА С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ ЛОПАСТЯМИ**

05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2016

Работа выполнена на кафедре «Транспортно-технологические машины» Чебоксарского политехнического института (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Акимов Александр Петрович

Официальные оппоненты **Мазитов Назиб Каюмович**
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор ФГБОУ ВО «Казанский
государственный аграрный университет»,
профессор кафедры «Машины и
оборудование в агробизнесе»

Купряшкин Владимир Федорович
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ
ВПО «Мордовский государственный
университет имени Н.П. Огарева», доцент
кафедры «Основы конструирования
механизмов и машин»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Ульяновская государственная
сельскохозяйственная академия имени П.А.
Столыпина»

Защита состоится 24 марта 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.117.06 при ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» по адресу: 430904, г. Саранск, п. Ялга, ул. Российская, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. М.М. Бахтина ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» и на сайте http://www.mrsu.ru/ru/diss/diss.php?ELEMENT_ID=56154

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г. и размещен на официальном сайте ВАК Минобрнауки РФ <http://vak2.ed.gov.ru> и ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» www.mrsu.ru «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.А. Величко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из энергоемких операций сельскохозяйственного производства является вспашка почвы лемешно-отвальными плугами. При этом, в условиях небольших размеров площадей (0,10-0,20 гектара), строго ограниченных межевыми границами в форме изгородей или деревьев, использование тракторов с лемешно-отвальными плугами для основной обработки почвы затруднено, и во многих случаях эти участки приходится обрабатывать вручную. По сравнению с обработкой полей с большой длиной гона затраты на обработку таких участков лемешно-отвальными плугами значительно возрастают.

Одним их эффективных путей снижения энергоемкости процесса основной обработки почвы является применение ротационных плугов на базе рабочих органов в виде эллиптических лопастей, у которых горизонтальные составляющие реакций почвы направлены в сторону движения агрегата, и, таким образом, помимо выполнения технологического процесса выполняют еще и функции движителей.

Поэтому, поиск энергосберегающих технологий, новых почвообрабатывающих рабочих органов и агрегатов является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение для развития народного хозяйства.

Степень разработанности темы. Теоретическими и экспериментальными исследованиями машин с ротационными рабочими органами (фрезы, рыхлители, плуги, бороздогребнеобразователи) занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Акимов А.П., Бернацки Г., Бок Н.Б., Василенко П.М., Гринчук И.М., Гуреев И.И., Далин А.Д., Докин Б.Д., Донцов В.Б., Жук Я.М., Зволинский В.Н., Зёне В., Зенин Л.С., Казаков Ю.Ф., Канарев Ф.М., Коновалов А.И., Купряшкин В.Ф., Кушнарев А.С., Лещанкин А.И., Лукьянов А.Д., Лысков А.С., Любимов Ф.С., Мазитов Н.К., Макаров П.И., Матяшин Ю.И., Медведев В.И., Некрасов П.А., Павлушин А.В., Панов И.М., Попов Г.Ф., Синеоков Г.Н., Чаткин М.Н., Шмонин В.А., Яцук Е.П. и др.

В ходе анализа установлено, что при всем многообразии научно-исследовательских работ, посвященных изучению ротационных почвообрабатывающих машин и рабочих органов, практически отсутствуют исследования, посвященные расчету силовых и мощностных характеристик ротационного рабочего органа (РРО) при широком изменении угла наклона β и режимов работы λ , ξ в зависимости от угла положения α эллиптической лопасти.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Чебоксарского политехнического института (филиала) ГОУ ВПО «Московский государственный открытый университет» по теме «Совершенствование рабочих органов-двигателей для основной обработки почвы и ресурсосберегающие машинные технологии» (протокол Ученого совета №1 от 29.01.2010г.), поддержана Фондом содействия малых

форм предприятий в научно-технической сфере (контракты №12043р/22883, №311ГС2/22883).

Цель исследований - снижение энергозатрат основной обработки почвы разработкой и применением ротационного плуга, снабженного рабочими органами с эллиптическими лопастями.

Объект исследования – рабочие органы с эллиптическими лопастями ротационного плуга.

Предмет исследования - взаимосвязь угла наклона эллиптической лопасти и режимов работы ротационного рабочего органа с силовыми и мощностными характеристиками.

Научную новизну работы составляют:

- конструктивно-технологическая схема ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями, новизна которого подтверждена патентом РФ на изобретение;

- методика выбора конструктивных параметров ротационного рабочего органа с эллиптическими лопастями на основе кинематического анализа;

- математические модели силовых и мощностных характеристик ротационного рабочего органа с эллиптическими лопастями;

- конструктивные параметры и режимы работы ротационного рабочего органа с эллиптическими лопастями по критерию минимальной энергоемкости процесса основной обработки почвы.

Практическую значимость представляют:

- разработанный и изготовленный ротационный плуг на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями для основной обработки почвы участков ограниченных межевыми границами;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть применены при проектировании, с некоторыми изменениями, и на других ротационных рабочих органах.

- почвенный канал с экспериментальной тележкой для исследования силовых характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин и адаптированная виртуальная лаборатория для генерации, записи и воспроизведения сигналов на базе программного обеспечения «ZetLab».

Методы исследования. Теоретические исследования выполнялись с использованием основных положений и законов механики, численных методов решения систем дифференциальных уравнений, математической статистики и разработанных авторских программ по обработке экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- конструктивно-технологическая схема ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями;

- математические модели взаимодействия эллиптической лопасти ротационного рабочего органа с почвой;

- результаты лабораторных исследований зависимостей угла наклона эллиптической лопасти и режимов работы ротационного рабочего органа на силовые и мощностные характеристики;

- результаты производственно-полевых проверок и технико-экономические показатели разработанного опытного образца ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями.

Реализация работы. Основные результаты исследования внедрены в сельскохозяйственный производственный кооператив «Заветы Ильича», крестьянско-фермерское хозяйство Голубева Ю.А. (Чувашская Республика, Порецкий район), учебный процесс Чебоксарского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» и переданы в ООО «Эллипс-ЧПИ» (Чувашская Республика, г. Чебоксары) для проектирования ротационных рабочих органов.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в печати в 12 научных работах, из них 3 статьи в источниках, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК РФ, получено 3 патента РФ на изобретение.

Личный вклад автора состоит в разработке концепции и формулировании цели работы, определении направлений теоретических и экспериментальных исследований, определении задач, организации и проведении комплексных исследований снижению энергоемкости процесса основной обработки почвы разработкой и применением ротационного плуга - от научного поиска до реализации предлагаемых решений.

Апробация. Основные положения и результаты работы доложены и одобрены на II, III Республиканском конкурсе инновационных проектов проводимых Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») (г. Чебоксары 2010, 2011гг.); Научно-практических конференциях Чебоксарского политехнического института (филиал) ФГБОУ ВПО «Московский государственный открытый университет имени В.С. Черномырдина» (г. Чебоксары 2010-2013гг.); Научно-практических конференциях Чебоксарского политехнического института (филиал) ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» (г. Чебоксары, 2014, 2015гг.); III Всероссийском конкурсе «УМНИК на СТАРТ», проводимым Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (г. Рязань, 2012г.); Московском международном форуме инновационного развития «Открытые инновации» (г. Москва, 2012г., вошел в «ТОП-100» инноваторов); IV Международном форуме «Ехрорpriority-2012» (г. Москва, 2012г., 3-е место); IX Республиканском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, молодых ученых и специалистов «Наука XXI века» - направление «Энергосберегающие технологии и нетрадиционные ресурсы» (г. Чебоксары, 2013г., 2-е место); Международной научно-практической конференции «Продовольственная безопасность и устойчивое развитие АПК» (г. Чебоксары, 2015г., ФГБОУ ВПО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия»).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 234 страницах машинописного текста, включает 106 рисунков и 14 таблиц, список использованной литературы содержит 167 наименований.

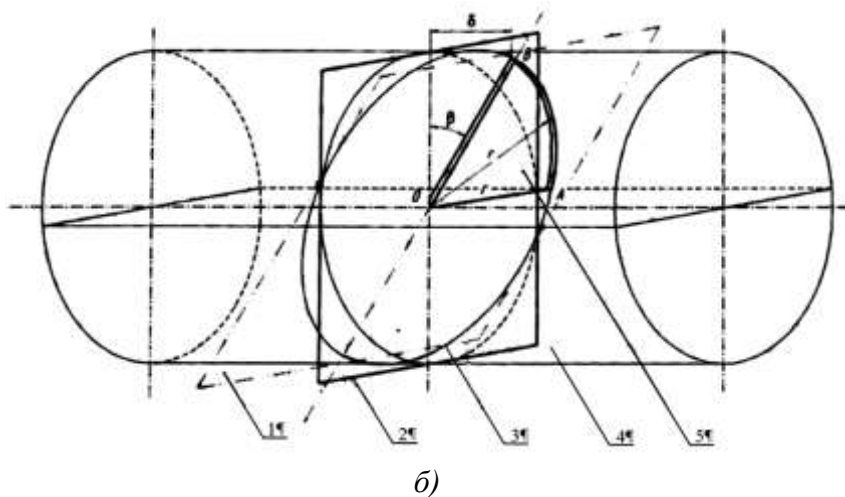
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и представлена общая характеристика работы, обозначена цель и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние проблемы и основные задачи исследования» приведен анализ материально-технического обеспечения агропромышленного комплекса (АПК), обзор исследований в области совершенствования почвообрабатывающих машин и орудий и обоснование выбранного направления работы.

В ходе анализа установлено, что при всем многообразии научно-исследовательских работ, посвященных изучению ротационных почвообрабатывающих машин и рабочих органов, практически отсутствуют исследования, посвященные расчету силовых и мощностных характеристик РРО с эллиптическими лопастями при широком изменении их конструктивных параметров и режимов работы (угол наклона эллиптической лопасти β , относительное заглубление $\xi = \frac{h}{r}$, кинематический параметр $\lambda = \frac{\omega r}{v_{\Pi}}$).

Конструкция ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями. В качестве исполнительных органов ротационного плуга предлагаются РРО с эллиптическими лопастями (рис. 1).



а)

б)

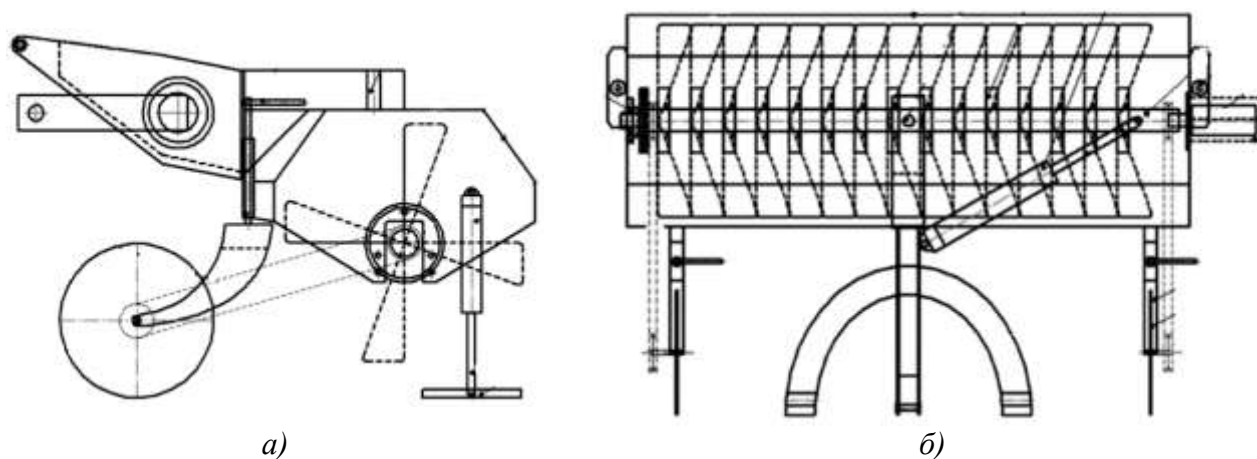
Рисунок 1 – Ротационный рабочий орган с эллиптическими лопастями

а) макетный образец ротационного рабочего органа;

б) схема для определения геометрических параметров эллиптических лопастей РРО

На рисунке 1,б: 1 – наклонная плоскость; 2 – плоскость вращения малой полуоси; 3 – эллипс; 4 – цилиндр; 5 – эллиптическая лопасть; β – начальный угол отклонения большой полуоси; δ – ширина захвата эллиптической лопасти; r – радиус основания цилиндра; $OA = r = a$ – радиус основания цилиндра; $OB = b$ – большая полуось эллипса.

Конструктивно-технологическая схема ротационного плуга, снабженного рабочими органами с эллиптическими лопастями, показана на рисунке 2.



а)
б)
Рисунок 2 – Схема ротационного плуга (вид сбоку)
а) вид сбоку; б) вид сверху

На основании поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследований**:

- разработать конструктивно-технологическую схему и опытный образец ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями;

- теоретически исследовать и разработать математические модели взаимодействия эллиптической лопасти ротационного рабочего органа с почвой;

- определить в лабораторных исследованиях взаимосвязь угла наклона эллиптической лопасти и режимов работы ротационного рабочего органа с силовыми и мощностными характеристиками;

- оценить качественные показатели ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями, его экономическую эффективность на основной обработке почвы.

Во второй главе приведены методики расчета силовых и мощностных характеристик ротационного рабочего органа с эллиптическими лопастями для основной обработки почвы.

Выбор конструктивных параметров ротационного рабочего органа с эллиптическими лопастями на основе его кинематического анализа. Изучение функционирования РРО с эллиптическими лопастями имеет не только чисто теоретическое, но и важное практическое значение. Проведение его кинематического анализа, является одной из основ для получения априорных условий, позволяющих рационально выбирать конструктивные параметры и режимы его работы. Рассматриваемый РРО воздействует на почву, как лезвиями малой, большой полуоси и криволинейным лезвием, так и самой поверхностью эллиптической лопасти.

Исходя из теории двухгранного клина, разработанной Г.Е. Листопадом и Ф.М. Канаревым было по аналогии предложено оценивать способность отвальных поверхностей рыхлить почву величиной угла θ между вектором

нормали к отвальной поверхности и вектором абсолютной скорости в любой точке рассматриваемой элементарной площадки этой поверхности.

Если малая полуось эллиптической лопасти находится в вертикальном положении в начальный момент времени $t=0$, то закон движения произвольной точки эллиптической лопасти в неподвижной системе координат $Oxyz$ (рис. 3) для значений угла φ ($0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$) и расстоянием от оси вращения ρ ($0 \leq \rho \leq r$) определяется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} x = -\rho \cos(\varphi + \omega t) + v_{\Pi} t; \\ y = \rho \cos \varphi \operatorname{tg} \beta; \\ z = -\rho \sin(\varphi + \omega t). \end{cases} \quad (1)$$

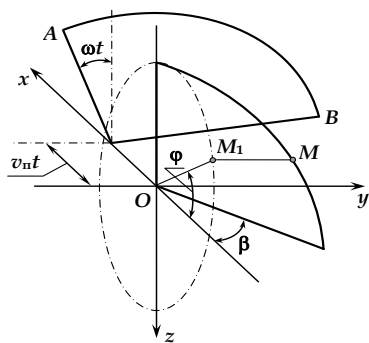


Рисунок 3 – Начальное и текущее положения лопасти относительно осей координат

Обозначим через θ (рис. 5) угол между векторами v и n и, введя безразмерный параметр $\zeta = \frac{\rho}{r}$, $1 - \xi \leq \zeta \leq 1$ (поскольку $r - h \leq \rho \leq r$), получим:

$$\cos \theta = \frac{v \cdot n}{v|n|} = \frac{\sin \beta (\lambda \zeta \sin \varphi + \cos \alpha)}{\sqrt{(\lambda \zeta)^2 + 2 \lambda \zeta \sin(\varphi + \alpha) + 1}}. \quad (2)$$

Рассмотрим, первую входящую в почву эллиптическую лопасть. Ее малая полуось находится в почве при углах поворота $90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$.

Для характерного значения $\lambda = 3,0$ графики зависимости угла θ от угла поворота α эллиптической лопасти представлены на рисунке 4а. Из графиков следует, что степень крошения почвы участками эллиптической лопасти, прилежащим к малой полуоси является наибольшей у дна борозды и уменьшается по мере приближения к дневной поверхности почвы. Даже при угле $\beta = 20^\circ$, угол принимает значения, близкие к значениям θ плугов ($45^\circ \pm 9^\circ$), а при $\beta = 60^\circ$ угол $\theta < 80^\circ$ т.е. меньше, чем у почвообрабатывающих фрез ($90^\circ \pm 9^\circ$). Таким образом, степень крошения почвы этим участком эллиптической лопасти близка к степени крошения почвы плугами.

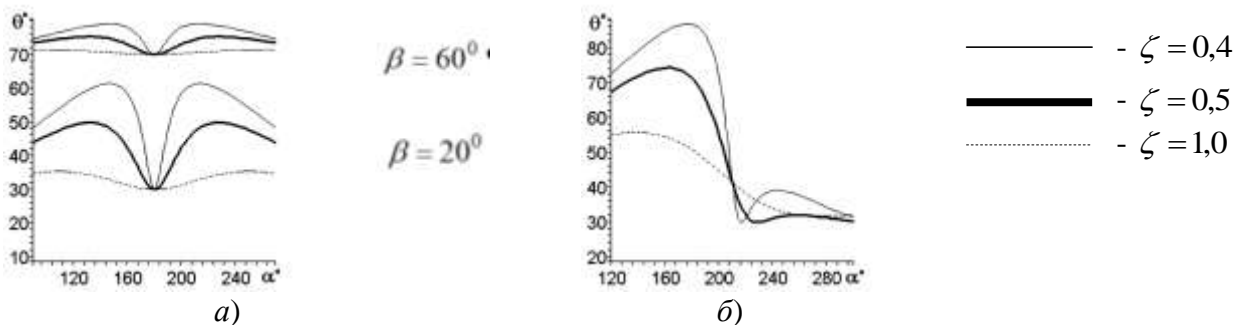


Рисунок 4 – Зависимости угла θ от угла поворота α эллиптической лопасти: а) для точек малой полуоси; б) для точек отрезка, определяемого углом $\varphi = 60^\circ$

Участок рассматриваемой эллиптической лопасти, прилежащей к отрезку, определяемого углом $\varphi = 60^\circ$, взаимодействует с почвой при углах поворота эллиптической лопасти $120^\circ \leq \alpha \leq 300^\circ$. При этом, угол θ для $\lambda = 3$ и $\beta = 45^\circ$ изменяется в соответствии с графиками, представленными на рисунке 4б. Угол θ на большей части данного участка эллиптической лопасти заметно меньше соответствующего угла для почвофрез. Начиная с момента начала выноса почвы из борозды, значения этого угла близки к значениям угла θ для плугов.

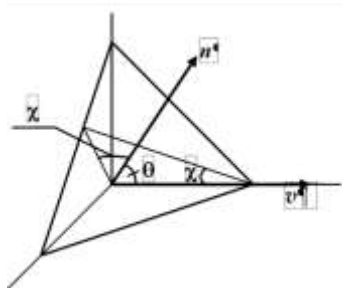


Рисунок 5 – Схема к определению углов θ и χ

Участки эллиптической лопасти, прилежащие к его криволинейному лезвию, можно рассматривать как элементарные трехгранные клинья с общей нормалью, являющейся одновременно нормалью к эллиптической лопасти, но имеющие различные абсолютные скорости.

Угол резания χ (рис. 5) определяется формулой (2) при $\zeta = 1$ по следующему выражению:

$$\sin \chi = \frac{\sin \beta (\lambda \sin \varphi + \cos \alpha)}{\sqrt{\lambda^2 + 2\lambda \sin(\varphi + \alpha) + 1}} \quad (3)$$

Графики зависимости угла резания χ от угла поворота α эллиптической лопасти при $\varphi = 0$ приведены на рисунке 6а для значений $\lambda = 2$, $\lambda = 3$, $\lambda = 6$.

Они построены для $h \leq r$ в интервале $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2}$. Из этих графиков следует, что участок криволинейного лезвия, прилегающий к большой его полуоси ($\varphi = 0$), при любой глубине обработки почвы будет иметь отрицательные углы резания вплоть до момента максимального заглубления этой полуоси при $\alpha \leq \frac{3\pi}{2}$. При отрицательных углах резания, элементарные участки криволинейного лезвия взаимодействуют с почвой как тупоугольные двухгранные клинья, что ведет к увеличению непроизводительных энергозатрат и ухудшению качества обработки почвы. Приведенные на рисунке 6б графики рассматриваемой зависимости при $\lambda = 2$ и значений $\varphi = 0$, $\varphi = 20^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ показывают, что величина участка с отрицательными углами резания может быть значительна при небольших значениях λ , а, значит, будут непроизводительные потери энергии при заметном ухудшении качества обработки почвы.



Рисунок 6 – Зависимости угла резания χ от угла поворота α эллиптической лопасти а) для точек большой полуоси; б) для точек криволинейного лезвия

Определение момента сопротивления трению о боковую поверхность эллиптической лопасти ротационного рабочего органа. Анализ теоретических исследований показал, что необходимо рассмотреть влияние угла поворота α на момент сопротивления трению о боковую поверхность эллиптической лопасти. Схема для расчета главных моментов сил трения приведена на рисунке 7. После всех преобразований зависимость главного момента m_T от сил трения почвы о эллиптическую лопасть примет следующий вид:

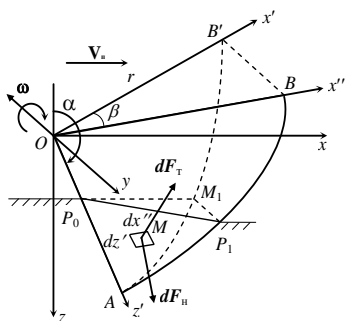


Рисунок 7 - Схема к расчету главных моментов сил трения относительно оси вращения эллиптической лопасти

$$m_T = \frac{fp}{\cos\beta} \iint_{S(\alpha)} \sqrt{(x' + a \sin\alpha)^2 + (z' + a \cos\alpha)^2} \cos^2\beta dx' dz' + F_{Tx} a, \quad (4)$$

где $S(\alpha)$ - проекция на плоскость $x'Oz'$ области, соответствующей части эллиптической лопасти, находящейся в почве; $a = \frac{r}{\lambda}$; p - среднее давление на часть эллиптической лопасти в почве; f - коэффициент трения почвы о эллиптическую лопасть (сталь); F_{Tx} - горизонтальная проекция главного вектора сил трения почвы о эллиптическую лопасть. Первое слагаемое в формуле (4) представляет собой главный момент m_T от сил трения относительно мгновенной оси вращения.

Введем двойной безразмерный интеграл:

$$I_1 = r^{-3} \iint_{S(\alpha)} [(x' + a \sin\alpha)^2 + (z' + a \cos\alpha)^2 \cos^2\beta]^{0.5} dx' dz'. \quad (5)$$

Из выражения (5) безразмерный момент $\tilde{m}_T = m_T / (pr^3)$ определяется формулой:

$$\tilde{m}_T = I_1 f / \cos\beta + \tilde{F}_{Tx} / \lambda, \quad (6)$$

Главный момент m_H от нормальных сил реакций почвы на эллиптическую лопасть относительно оси вращения РРО описывается двойным интегралом:

$$m_H = p \operatorname{tg}\beta \iint_{S(\alpha)} z' dx' dz'. \quad (7)$$

Введем еще один безразмерный двойной интеграл:

$$I_2 = r^{-3} \iint_{S(\alpha)} z' dx' dz'. \quad (8)$$

Из выражения (8) безразмерный момент $\tilde{m}_H = m_H / (pr^3)$ определяется по формуле:

$$\tilde{m}_H = I_2 \operatorname{tg}\beta. \quad (9)$$

Результирующий момент от реакций почвы на эллиптическую лопасть равен $m_p = m_T + m_H$, поэтому соответствующий безразмерный момент $\tilde{m}_p = m_p / (pr^3)$ будет равен:

$$\tilde{m}_p = \tilde{m}_r + \tilde{m}_h. \quad (10)$$

Для перехода от двойных интегралов к повторным разбиваем работу эллиптической лопасти на несколько этапов, разделяемых характерными ее положениями по углу поворота α :

- $\alpha_1 = \arccos(\xi - 1)$ – момент касания дневной поверхности почвы малой полуосью эллиптической лопасти при входе в почву (рис. 8а);
- $\alpha_2 = \pi + \arcsin(1 - \xi)$ – момент касания дневной поверхности почвы большой полуосью эллиптической лопасти при входе в почву (рис. 8б);
- $\alpha_3 = \pi + \arccos(1 - \xi)$ – момент касания поверхности почвы малой полуосью эллиптической лопасти при выходе из почвы (рис. 8в);
- $\alpha_4 = \frac{3\pi}{2} + \arccos(1 - \xi)$ – момент касания этой поверхности большой полуосью эллиптической лопасти при выходе из почвы (рис. 8г).

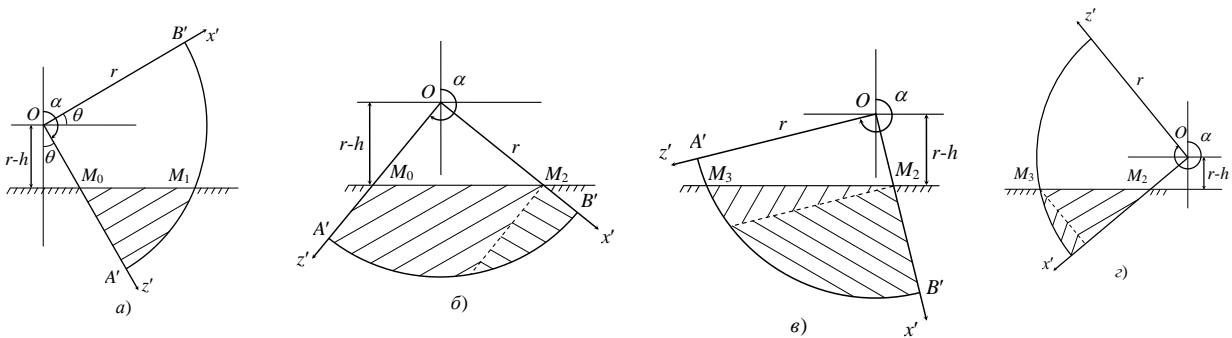


Рисунок 8 - Схема разбиения двойных интегралов на стандартные области и определения пределов интегрирования в повторных интегралах для этапов работы эллиптической лопасти рабочего органа при немалых заглублениях для:
а) I этапа; б) II этапа; в) III этапа; г) IV этапа

Возможны два случая заглубления:

- 1) немалые заглубления, соответствует $\frac{1 - \sqrt{2}}{2} < \xi \leq 1$ (т.е. $\alpha_3 > \alpha_2$ когда большая полуось эллиптической лопасти при входе в почву коснется дневной поверхности раньше, чем малая полуось коснется этой поверхности при выходе из нее);

- 2) малые заглубления, $0 < \xi < \frac{1 - \sqrt{2}}{2} \approx 0,293$, $\alpha_3 \leq \alpha_2$.

При немалых заглублениях работа эллиптической лопасти разбивается на этапы I – IV.

I. Угол поворота эллиптической лопасти ограничен неравенством $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$ (рис. 8а).

Описывается следующим интегралом:

$$I_1 = \int_0^{\vartheta_1} f_1(\vartheta) d\vartheta, \quad (11)$$

где $\vartheta_1 = \alpha - \arccos(\xi - 1)$, а подынтегральная функция равна сложной функции от переменной ϑ :

$$f_1(\vartheta) = \varphi\left(\sin \vartheta, \cos \vartheta, \frac{\xi - 1}{\cos \alpha - \operatorname{tg} \alpha \sin \vartheta}\right) \cos \vartheta. \quad (12)$$

Вычисление интеграла I_2 приводит к выражению:

$$I_2 = \left(\frac{1}{2}\right) \sin \vartheta_1 \left\{ 1 + \frac{(\xi - 1) \sin \alpha \sin \vartheta_1 - \left(\frac{1}{3}\right) \sin^2 \vartheta_1 - (\xi - 1)^2}{\cos^2 \alpha} \right\}. \quad (13)$$

II. Угол α удовлетворяет неравенству $\alpha_2 \leq \alpha \leq \alpha_3$ (рис. 8б).

Описывается следующим интегралом:

$$I_1 = \int_0^{\vartheta_2} f_1(\vartheta) d\vartheta + \int_{\vartheta_2}^{\frac{\pi}{2}} f_2(\vartheta) d\vartheta, \quad (14)$$

где $\vartheta_2 = \arcsin\left(\frac{\xi - 1}{\sin \alpha}\right)$, а подынтегральная функция второго интеграла в этом равенстве равна:

$$f_2(\vartheta) = \varphi(\sin \vartheta, \cos \vartheta, 0) \cos \vartheta. \quad (15)$$

Вычисление интеграла I_2 приводит к выражению:

$$I_2 = \frac{1}{3} - \frac{(\xi - 1)^3}{(6 \sin \alpha \cos^2 \alpha)}. \quad (16)$$

III. Угол α ограничен неравенством $\alpha_3 \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2}$ (рис. 8в).

Описывается следующим интегралом:

$$I_1 = \int_{\vartheta_3}^{\vartheta_2} f_1(\vartheta) d\vartheta + \int_{\vartheta_2}^{\pi/2} f_2(\vartheta) d\vartheta, \quad (17)$$

Вычисление интеграла I_2 приводит к выражению:

$$I_2 = \frac{(2 - 3 \sin \vartheta_3 + \sin^3 \vartheta_3)}{6} - \frac{(\xi - 1 - \sin \alpha \sin \vartheta_3)^3}{(6 \sin \alpha \cos^2 \alpha)}. \quad (18)$$

IV. Угол поворота эллиптической лопасти удовлетворяет неравенству $\frac{3\pi}{2} \leq \alpha \leq \alpha_4$ (рис. 8г).

Описывается следующим интегралом:

$$I_1 = \int_{\vartheta_2}^{\vartheta_3} f_3(\vartheta) d\vartheta + \int_{\vartheta_3}^{\pi/2} f_2(\vartheta) d\vartheta, \quad (19)$$

где ϑ_3 - подынтегральные функции первых интегралов, определяются формулой:

$$f_3 = \frac{\varphi(\sin \vartheta, (\xi - 1))}{\cos \alpha - \operatorname{tg} \alpha \sin \vartheta} \cos \vartheta. \quad (20)$$

I_2 определяется формулой (18).

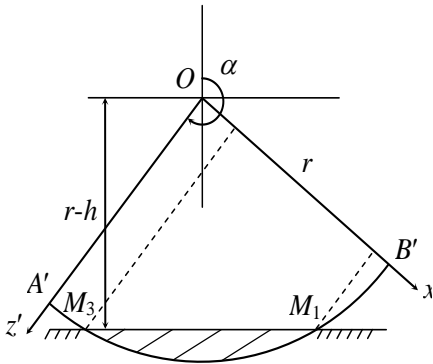
В случае малых заглаблений, при $0 < \xi < \frac{1 - \sqrt{2}}{2}$, большая полуось эллиптической лопасти коснется дневной поверхности почвы после выхода из нее малой полуоси, т.е. $\alpha_2 > \alpha_3$. Этот случай рассматривается аналогично

случаю немалых заглаблений. Здесь также необходимо выделить четыре этапа $I' - IV'$.

I. Угол α удовлетворяет неравенству $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_3$ (рис. 8а)

Интеграл I_1 , выражается через квадратуры по формуле (11), а I_2 находится по формуле (12).

II. Угол α ограничен неравенством $\alpha_3 \leq \alpha \leq \alpha_2$ (рис. 9)



$$I_1 = \int_{\vartheta_3}^{\vartheta_1} f_1(\vartheta) d\vartheta, \quad (21)$$

$$I_2 = \frac{\left\{ \frac{[\cos^2 \alpha - (\xi - 1)^2 (\sin \vartheta_1 - \sin \vartheta_3) - (\sin^3 \vartheta_1 - \sin^3 \vartheta_3)]}{3} + (\xi - 1)(\sin^2 \vartheta_1 - \sin^2 \vartheta_3) \sin \alpha \right\}}{2 \cos^2 \alpha}. \quad (22)$$

III. Угол α ограничен неравенством $\alpha_2 \leq \alpha \leq \frac{3\pi}{2}$

(рис. 8в).

Формула (11) выражает интеграл I_1 через квадратуры, а интеграл I_2 определяется формулой (12).

IV'. Этот этап совпадает с этапом IV немалых заглаблений (рис. 8г) т.е. $\frac{3\pi}{2} \leq \alpha \leq \alpha_4$.

Рисунок 9 - Схема разбиения двойных интегралов на стандартные области и определения пределов интегрирования в повторных интегралах для этапа II при малых заглаблениях эллиптической лопасти

На рисунке 10а, приведен график зависимости суммарного момента \tilde{m}_p эллиптической лопасти от угла ее поворота α в градусах при $\xi = 0,5$ и $\beta = 45^\circ$ для различных λ . Суммарный момента \tilde{m}_p возрастает незначительно с ростом кинематического параметра λ . Поэтому, поступательное движение обеспечивается за счет тяговых средств. График зависимости момента \tilde{m}_p эллиптической лопасти от α при $\lambda = 2,5$ и $\xi = 0,5$ для различных значений угла наклона лопасти β приведен на рисунке 10б. С увеличением угла β больше $\approx 40^\circ$ наблюдается продолжительное взаимодействие с почвой. В итоге, значительная часть стружки сбрасывается вперед, подвергается повторному воздействию следующей лопастью, что приводит к увеличению энергозатрат. На рисунке 10в, приведен график зависимости момента \tilde{m}_p эллиптической лопасти от α при $\lambda = 2,5$ и $\beta = 45^\circ$ для различных значений параметра ξ . Графики показывают, что при увеличении относительного заглабления ξ возрастает давление на эллиптическую лопасть и это необходимо учитывать при проектировании, как самих рабочих органов, так и конструкции их крепления к валу.

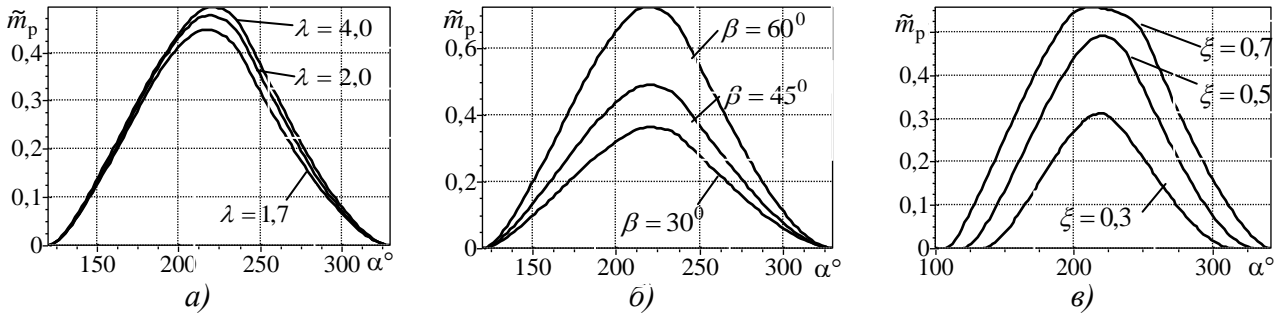


Рисунок 10 – Графики зависимости момента \tilde{m}_p эллиптической лопасти от угла ее поворота α в градусах для различных:
а) λ ; б) β ; в) ξ .

Определение результирующих сил резания почвы лезвием эллиптической лопасти ротационного рабочего органа. Малая полуось эллиптической лопасти разрезает почву, совершая плоскопараллельное движение в вертикальной плоскости. В системе координат Oxz с центром O , расположенным на оси вращения и положение малой полуоси задается углом поворота α (рис. 11). Скорость резания почвы определяется положением мгновенного центра скоростей РРО, находящегося в точке $C(0;a)$.

На произвольно бесконечно малый элементарный участок режущей части лезвия длиной dz' , прилегающей к точке $M'(0;z')$, действует элементарная сила $\overline{dR_{л}}$, направленная противоположно вектору \bar{v} абсолютной скорости точки. Величина этой силы равна

$$dR_{л} = Q \cdot dz', \quad (23)$$

где Q - средняя удельная сила резания, приходящаяся на единицу длины лезвия.

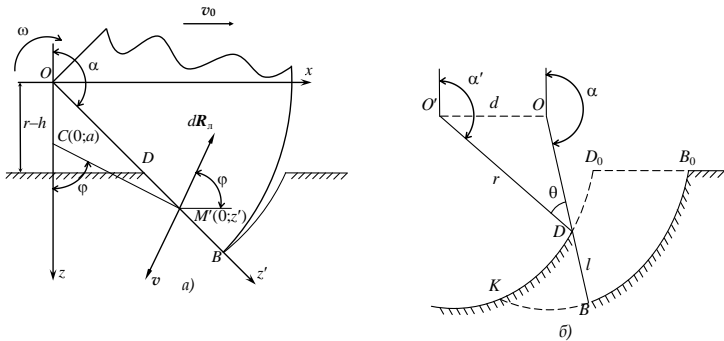


Рисунок 11 – Схема резания почвы лезвием эллиптической лопасти РРО:
а) первой; б) не первой

После интегрирования равенства (23) по отрезку режущей части лезвия эллиптической лопасти, получим горизонтальную проекцию результирующей силы сопротивления резанию (ССР):

$$dR_{лx} = -\frac{Qr}{\lambda} \int_{\lambda \cdot \zeta_0}^{\lambda} \frac{(u \cos \alpha + 1) du}{\sqrt{u^2 + 2u \cos \alpha + 1}}, \quad (24)$$

где $\zeta_0 = 1 - l(\alpha, \xi)/r$, а $l(\alpha, \xi)$ – длина режущей части лезвия, соответствующая углу поворота α при максимальном заглублении лопасти h .

Аналогично находится вертикальная проекция этой силы:

$$dR_{Jz} = -\frac{Qr}{\lambda} \int_{\lambda \cdot \xi_0}^{\lambda} \frac{u \sin \alpha du}{\sqrt{u^2 + 2u \cos \alpha + 1}}. \quad (25)$$

Из формулы (24) следует, что для первой эллиптической лопасти горизонтальная ССР зависят только от $\cos \alpha$, а для последующих лопастей оказывается справедливой лишь до момента касания лезвия поверхности отрезаемой стружки в точке D_0 . Графики их зависимости от α для относительного заглубления $\xi = 0,5$ и значений $\lambda = 3$; $\lambda = 3,5$; $\lambda = 5$ показаны на рисунке 12.

Проекция R_{Jx} (рис. 12а, 12в) является положительной, т.е. ССР является движущей силой. Вертикальная проекция ССР R_{Jz} (рис. 12б, 12г) отрицательна при $\alpha < \pi$, значит, ССР является выглубляющей силой. При $\alpha > \pi$ эта проекция положительна, и ССР становится заглубляющей силой.

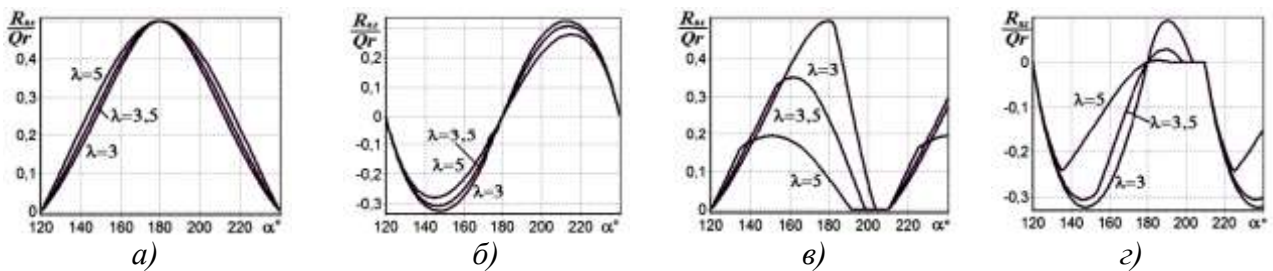


Рисунок 12 – Зависимости от угла поворота α для первой (а,б) и не первой (в,г) эллиптической лопасти результирующей сил сопротивления почвы резанию а),в) проекции на ось Ox ; б),г) проекции на ось Oz

Эти зависимости необходимо учитывать при расчете РРО на прочность. С увеличением параметров λ и ξ ССР монотонно возрастают.

Определение потребной мощности привода ротационного рабочего органа с эллиптическими лопастями. Мощность для привода РРО с эллиптическими лопастями складывается из двух составляющих – мощности, затрачиваемой на резание почвы лезвием эллиптической лопасти, и на взаимодействие ее боковой поверхности с почвой.

Мощность для привода рабочего органа с эллиптическими лопастями определяется формулой $N = m_p \omega$, а безразмерная мощность ($\tilde{N} = N / (pr^2 v_p)$), выражается формулой - $\tilde{N} = \tilde{m}_p \lambda$. Графики этих зависимостей от параметров λ , ξ , β приведены на рисунке 13.

Необходимо отметить, что на максимальное значение потребной мощности, затрачиваемой на взаимодействие боковой поверхности первой эллиптической лопасти с почвой, оказывает некоторое влияние вторая лопасть следующая за первой. Это влияние незначительно и составляет величину порядка 10% при $\xi = 0,7$ и уменьшается с уменьшением относительного заглубления, не оказывая влияния на \tilde{N}_m при малых ξ .

Предложенная методика определения максимальной мощности для привода РРО с эллиптическими лопастями позволяет максимально упростить определение различных силовых характеристик и значительно сократить объем

необходимых дорогостоящих лабораторных и полевых экспериментов при проектировании.

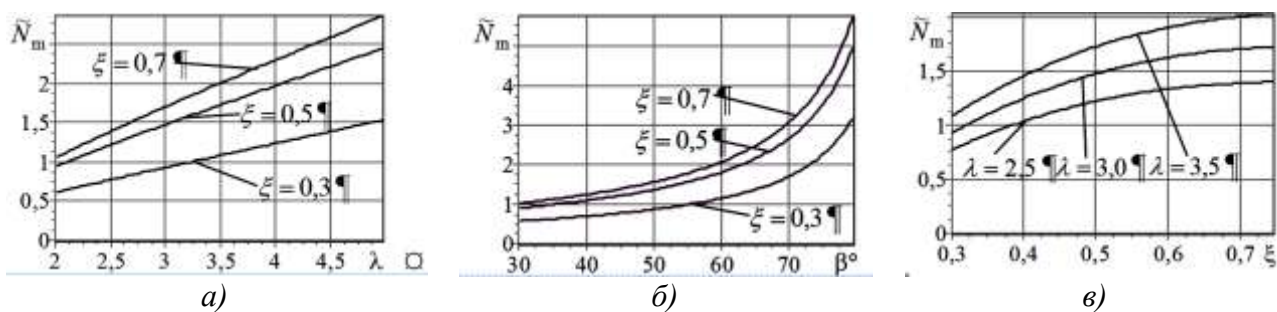


Рисунок 13 – График зависимости \tilde{N}_m от:

- а) λ при различных значениях ξ ; б) угла β при различных значениях ξ ;
в) ξ при различных значениях λ

Полученные теоретические зависимости различных характеристик РРО с эллиптическими лопастями могут быть использованы для определения оптимальных режимов работы и геометрических параметров по различным критериям.

Кроме того, общность основных исходных положений, принятых в математической модели, может быть перенесена с некоторыми изменениями и на другие ротационные рабочие органы почвообрабатывающих машин и агрегатов.

В третьей главе приведена программа и методика экспериментальных исследований. Программа предусматривала лабораторные исследования по определению силовых и мощностных характеристик в разработанном и изготовленном почвенном канале, оснащенном экспериментальной тележкой (рис. 14) в зависимости от угла наклона эллиптической лопасти и режимов работы РРО, описано оборудование, применяемое в лабораторных исследованиях. Для снятия характеристик подталкивающего усилия R_x и крутящего момента $M_{кр}$, были изготовлены, соответственно, тензокольцо, полумуфта с токосъемником. Программное обеспечение «ZetLab» адаптировано для записи сигналов на многоканальный цифровой осциллограф.



Рисунок 14 – Вид общий экспериментальной тележки

Для проведения производственно-полевой проверки нами были разработаны и изготовлены опытные образцы ротационных плугов РР-1 (гидравлический привод), РР-2 (механический привод), снабженные рабочими органами с эллиптическими лопастями).

При проведении лабораторно-полевых исследований руководствовались ГОСТ 20915-75 «Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний» и др. Обработку экспериментальных данных осуществляли на ПК с помощью, разработанной нами программы «ExpFit».

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований и их анализ. Для анализа результатов лабораторных исследований нами была разработана программа «ExpFit», позволяющая строить и накладывать в одном диалоговом окне теоретические и экспериментальные графики по заданному углу наклона эллиптической лопасти и режимам работы РРО. Скриншот рабочего окна, разработанной программы «ExpFit» показан на рисунке 15. Сплошные кривые на этих рисунках строятся по полученным математическим моделям, а квадратиками изображаются результаты лабораторных испытаний.

В результате проведения в почвенном канале серии опытов, получены графики силовых, мощностных и энергетических характеристик рабочего органа с эллиптическими лопастями. Теоретические зависимости силовых параметров совпадают с экспериментальными на 90-95%.

По результатам лабораторных исследований установлено, что наименьшие энергозатраты обеспечиваются при режимах работы $\lambda = 2-2,5$, относительных заглублениях $\xi = 0,5-0,6$ и угле наклона эллиптической лопасти $\beta = 20^\circ - 30^\circ$.

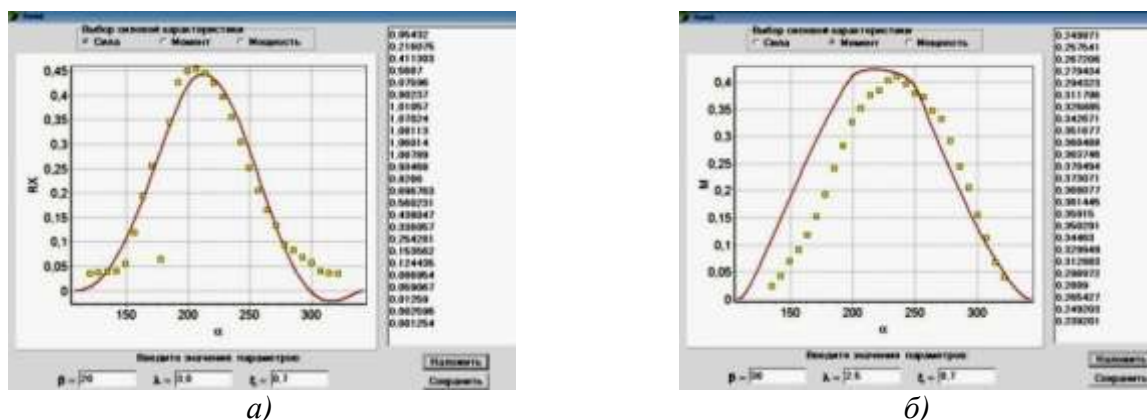


Рисунок 15 - Скриншот рабочего окна, разработанной программы «ExpFit»
 а) характеристика подталкивающего усилия R_x ;
 б) характеристика крутящего момента $M_{кр}$

В пятой главе представлена технико-экономическая оценка работы ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями. Проверка ротационного плуга на базе рабочих органов с эллиптическими лопастями в производственных условиях производилась в сельскохозяйственном производственном кооперативе «Заветы Ильича» (Чувашская Республика, Порецкий район) и Крестьянско-фермерском хозяйстве Голубева Ю.А. (Чувашская Республика, Порецкий район), подтвердила достоверность теоретических предпосылок (рис. 18). При этом, средняя производительность за 1 ч эксплуатационного времени составила $0,26 \frac{га}{ч}$; расход горючего – $23,0 \frac{кг}{га}$. Расчетный годовой приведенный экономический эффект от эксплуатации ротационного плуга составляет - 264863,4 рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. С целью снижения энергозатрат основной обработки почвы предложена конструкция ротационного плуга, снабженного рабочими органами с эллиптическими лопастями (патент на изобретение №2569977) и разработан опытный образец шириной захвата $B=1,4$ м для агрегатирования с тракторами тягового класса 1,4.

2. Теоретически исследованы и выведены уравнения расчета силовых и мощностных характеристик взаимодействия эллиптической лопасти рабочего органа с почвой. Установлено оптимальное соотношение угла наклона эллиптической лопасти β и угла крошения θ , обеспечивающее лучшую степень крошения почвы.

3. По результатам исследований определены оптимальные конструктивные параметры рабочего органа с эллиптическими лопастями по критериям минимальных энергозатрат: угол наклона эллиптической лопасти $\beta = 20^\circ - 30^\circ$; диаметр $D=0,54-0,58$ м; количество эллиптических лопастей на 1 рабочий орган – 4; режим работы для основной обработки почвы: относительное заглубление $\xi = 0,5-0,6$; кинематический параметр $\lambda = 2,0-2,5$.

4. Проведена производственно-полевая проверка опытного образца ротационного плуга с механическим приводом. В результате получены следующие данные:

- эксплуатационная производительность в среднем выросла по сравнению с плугом ПЛН-3-35 на участках, ограниченных межевыми границами с $0,21 \frac{га}{ч}$ ($441 \frac{м^3}{ч}$) до $0,26 \frac{га}{ч}$ ($676 \frac{м^3}{ч}$), что составляет 19,2%, а в перерасчете на $\frac{м^3}{ч}$ – 34,7%;

- расход топлива снизился в среднем с $28,2 \frac{кг}{га}$ ($0,015 \frac{кг}{м^3}$) до $23,0 \frac{кг}{га}$ ($0,009 \frac{кг}{м^3}$), что составляет 18,4%, а в перерасчете на $\frac{кг}{м^3}$ – 40%.

За счет повышения эксплуатационной производительности и себестоимости механизированных работ на единицу выработки годовой экономической эффект от использования опытного образца ротационного плуга на основной обработке почвы участков, ограниченных межевыми границами составил 264863,4 рубля.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Федоров, Д.И. Расчет мощности привода ротационного лопастного рабочего органа почвообрабатывающей машины / Д.И. Федоров, А.П. Акимов, Ю.В. Константинов // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – Вып. 5. – С. 27-32.

2. Федоров, Д.И. Методика расчета сопротивления и момента сопротивления резанию почвы / Д.И. Федоров, А.П. Акимов, Ю.В. Константинов // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – Вып. 3. – С. 32-35.

3. Выбор рациональных параметров лопастного ротационного рабочего органа на основе его кинематического анализа / Д.И. Федоров [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – Вып.1. – С. 36-39.

Патент на изобретение

4. Патент №2487516 Российская Федерация, МПК А01В 33/10, А01В 71/00. Почвообрабатывающая машина / Акимов А.П., Федоров Д.И., Васильев А.Г., Чегулов В.В.; заявители и патентообладатели Акимов А.П., Васильев А.Г. – 2012106100/13: заявл. 20.02.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. №20. – 7 с.

5. Патент №2495552 Российская Федерация, МПК А01В 33/02, А01В 33/10. Рабочий орган почвообрабатывающего орудия / Акимов А.П., Федоров Д.И., Павлов И.А., Чегулов В.В., Никифоров И.В.; заявители и патентообладатели Акимов А.П., Павлов И.А. – 2012107544/13: заявл. 10.04.2012; опубл. 20.10.2013, Бюл. №29. – 4 с.

6. Патент №2569977 Российская Федерация, МПК А01В 33/02. Ротационный рыхлитель / Федоров Д. И., Акимов А. П., Чегулов В. В., Федорова И. В.; заявитель и патентообладатель ООО «Эллипс-ЧПИ». – 2014132531/13: заявл. 06.08.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. №34. – 8 с.

Публикации в сборниках научных трудов и материалов конференций

7. Федоров, Д. И. Рабочий орган-двигатель с эллиптическими лопастями для основной обработки почвы / Д. И. Федоров, А. П. Акимов // Сборник трудов студенческой научной конференции. – Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт (филиал) МГОУ, 2010. – Вып. 5. – С. 38-43

8. Федоров, Д.И. Движущая сила от реакций резания режущей кромкой эллипсовидной лопасти рабочего органа-двигателя для основной обработки почвы / Д.И. Федоров, А.П. Акимов, И.Н. Аквильянова // Инновации в образовательном процессе. Сборник трудов НПК. – Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт (филиал) МГОУ, 2010. – Вып. 8. – С. 38-43.

9. Федоров, Д.И. Момент сопротивления резанию лезвием эллипсовидной лопасти почвообрабатывающего рабочего органа-двигателя/ Д.И. Федоров, А.П. Акимов, И.Н. Аквильянова // Инновации в образовательном процессе. Сборник трудов НПК. – Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт (филиал) МГОУ, 2010. – Вып. 9. – С. 38-43.

10. Федоров, Д.И. Обоснование параметров почвенного канала для определения силовых характеристик рабочих органов-двигателей с эллиптическими лопастями для основной обработки почвы / Д.И. Федоров, А.П. Акимов, Ю.В. Константинов // Инновации в образовательном процессе. Сборник трудов НПК. – Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт (филиал) МГОУ, 2010. – Вып. 9. – С. 43-49.

11. Федоров, Д.И. Состояние и перспективы развития сельского хозяйства на примере Чувашской Республики / Д.И. Федоров // Инновации в

образовательном процессе. Сборник трудов НПК. - Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт (филиал) МГОУ, 2013. – Вып. 11. – С. 4-9.

12. Федоров, Д. И. Разработка почвообрабатывающих орудий с применением рабочих органов-двигателей с эллиптическими лопастями / Д. И. Федоров, А. П. Акимов // Наука XXI века: сб. науч. ст. победителей и призеров IX Республиканского конкурса научно-исследовательских работ студентов, молодых ученых и специалистов. – Чебоксары, 2013. – С. 142 – 145.

13. Федоров, Д.И. Силовые характеристики прямого ножа почвообрабатывающего ротационного рабочего органа / Д.И. Федоров, А.П. Акимов, Ю.В. Константинов // Инновации в образовательном процессе: сб. тр. науч.-практ. конф. - Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт, 2014. – Вып. 12. – С. 82-84.

14. Федоров, Д.И. Использование программного обеспечения ZetLab в лабораторных исследованиях / Д.И. Федоров, А.П. Акимов, В.П. Мазяров // Инновации в образовательном процессе: сб. тр. науч.-практ. конф. - Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт, 2014. – Вып. 12. – С. 116-121.

15. Федоров, Д.И. Ротационный рыхлитель / Д.И. Федоров, А.П. Акимов, В.В. Чегулов // Инновации в образовательном процессе: сб. тр. науч.-практ. конф. - Чебоксары : Чебоксарский политехнический институт, 2015. – Вып. 13. – С. 121-125.

Подписано к печати _____

Формат 60×84/16. Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Издательство ЧПИ(ф) МГМУ МАМИ
428022 г. Чебоксары, ул. П. Лумумбы, 8