

*На правах рукописи*

*И. А. Будашов*

Будашов Игорь Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТАЦИОННО-ДИСКОВОГО  
РЕЖУЩЕГО АППАРАТА ДЛЯ РЕЗАНИЯ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ  
КУЛЬТУР**

Специальность 05.20.01 –  
Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2013

Работа выполнена в Рубцовском индустриальном институте (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: **Ситников Александр Андреевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Докин Борис Дмитриевич**  
доктор технических наук, профессор, ГНУ Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Сибирского отделения Российской сельскохозяйственной академии, руководитель лаборатории использования машинно-тракторного парка в сельскохозяйственных предприятиях

**Федюнин Павел Иванович**

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой «Автомобили и тракторы»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита состоится «11» декабря 2013 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, РФ, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.  
http: [www.altstu.ru](http://www.altstu.ru); [ntsc@desert.secna.ru](mailto:ntsc@desert.secna.ru); тел./факс (3852) 36-71-29

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Автореферат разослан и размещён на сайте http: [www.altstu.ru](http://www.altstu.ru)  
« 8 » ноября 2013 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д. т. н., профессор



Куликова Лидия Васильевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Режущие аппараты толстостебельных культур применяются для резания стеблей кукурузы, подсолнечника, кустарниковой поросли и др. культур. Стебли срезаются для дальнейшего применения в сельскохозяйственном производстве, в зависимости от степени последующего измельчения, либо в качестве корма животным, либо в качестве удобрения.

Существующие в настоящее время режущие аппараты толстостебельных культур имеют такие недостатки, как низкая производительность, наличие повторных срезов стеблей, большие знакопеременные инерционные усилия, вибрация рамы, шум, сложность привода, громоздкость и повышенная металлоёмкость конструкции. Кроме того, повышенный расход энергии, недолговечность режущих кромок ножей, жёсткое крепление рабочих органов не отвечают возросшим требованиям, как кормопроизводства, так и служб механизации коммунального хозяйства при обрезке кустарников вблизи воздушных линий электропередачи, а также при плановых контурных обрезках городских насаждений кустарников, уборочных работах в садах и парках.

Для устранения этих недостатков необходимо дальнейшее совершенствование процесса резания толстостебельных культур и изыскание новых конструктивных решений, обеспечивающих не только повышение производительности, но и снижение расхода энергии, увеличение долговечности за счёт совершенствования рабочих органов. Поэтому проблема изучения влияния параметров процесса резания толстостебельных культур на мощность, потребляемую ротационно-дисковым режущим аппаратом, является актуальной и своевременной.

**Цель работы** — повышение эффективности процесса резания толстостебельных культур ротационно-дисковым режущим аппаратом путём снижения энергозатрат, за счёт рационального сочетания таких факторов, как принцип среза, подача, форма линии лезвия ножей и частота вращения диска.

**Научная гипотеза** заключается в том, что между конструктивно-режимными параметрами ротационно-дискового режущего аппарата, углом входа стеблей при подаче, диаметром срезаемых стеблей и мощностью резания толстостебельных культур существует взаимосвязь. Для определения минимального значения мощности, потребляемой на резание толстостебельных культур, необходимо обосновать рациональные значения факторов, участвующих в процессе резания.

Для достижения указанной цели на основании выдвинутой гипотезы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ процессов резания, осуществляемых режущими аппаратами толстостебельных культур.
2. Построить схему работы ротационно-дискового режущего аппарата с уравнениями движения точек ножей; траекторию лезвий ножей, с

наименьшими затратами потребляемой энергии и траекторию лезвий ножей режущего аппарата с наименьшими затратами потребляемой энергии на единицу длины активной части лезвия для испытуемых культур. Предложить функции отклика, описывающие энергоёмкость резания подсолнечника, кукурузы и кустарниковой поросли клёна.

3. Обосновать теоретически и подтвердить экспериментально влияние изменения конструктивно-режимных параметров (подачи, частоты вращения, геометрии и вида заточки режущей кромки ножа, наличия и отсутствия ножа-рассекателя), видов толстостебельных культур и углов входа стеблей при подаче на потребляемую мощность резания.

4. Разработать методику инженерного расчета ротационно-дискового аппарата.

5. Определить экономическую эффективность применения предлагаемого режущего аппарата.

**Объект исследования** — ротационно-дисковый аппарат вертикального типа с ножевыми рабочими органами для резания толстостебельных культур.

**Предмет исследования** — процесс резания толстостебельных культур.

**Методика и методы исследования.** Теоретические исследования выполнялись с использованием теории резания, основных положений, законов и методов классической механики, планирования экспериментов, математики и статистики.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на основе общепринятых методик. Основные расчёты и обработка результатов экспериментов выполнялись с использованием программного продукта «Statgraphics plus 5.0» на ПК.

**Научную новизну работы** представляют:

— конструкция ротационно-дискового режущего аппарата вертикального типа для резания толстостебельных культур (поданы заявки на изобретение и полезную модель);

— теоретические зависимости потребляемой мощности резания от принципа среза, подачи, формы линии лезвия ножа, частоты вращения диска, отклонения стеблей от вертикали и диаметра стеблей при резании стеблей кукурузы, подсолнечника и кустарниковой поросли клёна;

— результаты исследований комплексного влияния таких факторов, как принцип среза, подача, форма линии лезвия ножа, частота вращения диска, отклонение стебля от вертикали и диаметр стебля на мощность;

— уравнения регрессии мощности, потребляемой при резании стеблей кукурузы, подсолнечника и кустарниковой поросли клёна ротационно-дисковым режущим аппаратом;

— зависимости изменения потребляемой мощности от изменения принципа среза, подачи, формы линии лезвий ножей, частоты вращения диска, отклонения стебля от вертикали и диаметров стеблей;

— рациональные соотношения между параметрами таких факторов, как принцип среза, подача, форма линии лезвия ножа и частота вращения

диска для уменьшения мощности, потребляемой ротационно-дисковым аппаратом при резании стеблей подсолнечника, кукурузы и кустарниковой поросли клёна.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в установлении зависимости потребляемой мощности резания от принципа среза, подачи, формы линии лезвия ножа, частоты вращения диска, отклонения стеблей от вертикали и диаметра стеблей при резании стеблей кукурузы, подсолнечника и кустарниковой поросли клёна.

**Практическая значимость.** Предложен ротационно-дисковый аппарат вертикального типа с ножевыми рабочими органами для резания толстостебельных культур. На основании проведённых теоретических и экспериментальных исследований определены конструктивные параметры и режимы работы аппарата, которые обеспечивают минимальный расход мощности, потребляемой при резании. Предложена методика инженерного расчёта аппарата.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивалась применением статистических методов оценки погрешности измерений экспериментальных данных, что обеспечило сходимость теоретических положений с результатами экспериментов.

**Реализация результатов исследований.** Результаты, полученные в ходе исследований, используются в ОАО «Рубцовский ПКТИ» в качестве рекомендаций по расчёту потребляемой мощности и проектированию ротационно-дисковых режущих аппаратов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- конструктивная схема ротационно-дискового режущего аппарата;
- параметры режущего аппарата и их энергетическая эффективность;
- уравнения движения точек ножей и результаты теоретических исследований влияния конструктивно-режимных параметров (подачи, частоты вращения, формы линии лезвия ножа, принципа среза), угла входа стеблей при подаче и диаметра стеблей на потребляемую мощность резания;
- уравнения регрессии, которые позволяют определить мощность, затрачиваемую на резание толстостебельных культур, в зависимости от конструктивно-режимных параметров (подачи, частоты вращения, формы линии лезвия ножа, принципа среза), угла входа стеблей при подаче и диаметра стеблей;
- методика инженерного расчета ротационно-дискового режущего аппарата.

**Апробация результатов исследований.** Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (Рубцовск, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Рубцовск, 2006); на объединённом заседании кафедр «СХМ», «АиАХ», «АТ» и «Теор. мех.» ФБГОУ ВПО АлтГТУ (Барнаул, 2.11.2012); на расширенном заседании кафедры «Наземные транспортные

системы» РИИ (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ (Рубцовск, 28.02.2012), а также на совместном заседании отделов Рубцовского ПКТИ (Рубцовск, 05.06.2013).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных статей, в том числе семь — в изданиях, указанных в «Перечне ведущих рецензируемых научных изданий и журналов», рекомендованном ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, общих выводов, списка литературы из 116 наименований и приложений. Работа содержит 159 страниц, 53 рисунка, 14 таблиц и 8 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко изложено современное состояние проблемы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Состояние вопроса и задачи исследования» приведён анализ научно-исследовательской и патентной литературы, обзор режущих аппаратов толстостебельных культур и классификация режущих аппаратов. В настоящее время широкое распространение получили ротационные режущие аппараты как отечественного, так и иностранного производства. Ротационные режущие аппараты обладают рядом преимуществ, к основным из которых можно отнести высокую производительность и простоту конструкции. Однако, удельный расход энергии ротационных режущих аппаратов гораздо выше, чем у сегментно-пальцевых.

Большой вклад в развитие теорий резания внесли многие учёные: В. П. Горячкин, С. В. Мельников, Г. И. Проценко, И. Ф. Пикуза, Н. Е. Резник, Е. С. Босой, В. А. Желиговский, И. Ф. Василенко, Н. В. Сабликов, Г. И. Бремер, А. А. Ивашко, Т. И. Егорова, В. А. Зяблов, А. Н. Карпенко, Ю. Ф. Новиков, В. И. Фомин и другие.

**Во второй главе** «Теоретические исследования» приведена конструктивная схема дискового режущего аппарата; определена формула энергетической оценки ротационно-дискового режущего аппарата и получены формулы затрат мощности, потребляемой при резании с учётом таких параметров, как принцип среза, подача, частота вращения, форма линии лезвия ножа, угол входа стеблей при подаче и диаметр стеблей. Построены схема работы ротационно-дискового режущего аппарата с уравнениями движения точек ножей; траектория лезвий ножей, с наименьшими затратами потребляемой энергии, и траектория лезвий ножей режущего аппарата с наименьшими значениями потребляемой энергии на единицу длины активной части лезвия для испытываемых культур.

Конструктивная схема дискового режущего аппарата представлена на рисунке 1.

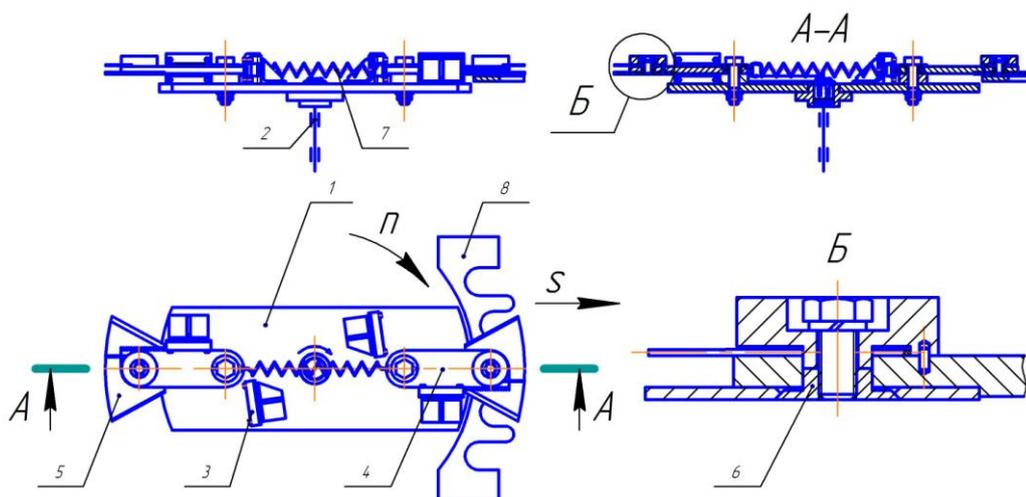


Рисунок 1 — Схема аппарата: 1 — диск; 2 — вал; 3 — упругие буферы; 4 — державки; 5 — ножи; 6 — втулка; 7 — пружина; 8 — нож-рассекатель.

Аппарат состоит из диска 1, установленного на вертикальном валу 2. На корпусе установлены упругие буферы 3 и зафиксированы державки 4. Ножи 5 крепятся посредством прижатия их к державке 4 втулкой 6, имеющей конусообразный бурт. Пружина 7 соединяющая державки ускоряет их возврат в рабочее положение. Под зоной действия ножей установлен гребнеобразный нож-рассекатель 8.

Для повышения надёжности технологического процесса, снижения себестоимости, упрощения конструкции и сокращения времени на возврат отклоняющихся ножей в стабильное рабочее положение державки соединены пружиной растяжения и ограничены во вращении вокруг осей буферными устройствами из упругого материала. Крутящий момент передаётся маховику от вала с помощью шлицевого эвольвентного соединения, как более технологичного, чем шлицевое прямобочное. Лезвия ножей имеют прямую направляющую, а не радиусную вогнутую, как более технологичную и менее энергоёмкую при эксплуатации.

Для определения рациональных параметров и режимов работы режущего аппарата было изготовлено три типа ножей (с прямым лезвием, с криволинейным вогнутым лезвием, с криволинейным вогнутым насечённым лезвием).

Рассмотрим процесс разрушения толстостебельных культур. При движении ножа через слой материала, в соответствии с рисунком 2, на него действуют следующие силы:  $P_{рез}$  - сопротивление разрушению материала, Н;  $P_{сж}$  - сопротивление слоя сжатию фаской лезвия, Н;  $P_{обж}$  - силы обжатия материалом, действующие на боковые грани лезвия, Н. Для преодоления равнодействующей  $R$  сопротивлений требуется приложить со стороны ножа равную ей и противоположно направленную силу  $P_{кр}$ , составляющими которой являются окружное усилие  $P$ , направленное перпендикулярно радиус-вектору  $r$ , и усилие  $P_1$ , действующее по направлению радиус-вектора. Угол между радиус-вектором и лезвием ножа равен углу скольжения  $\tau$ . Критическую силу  $P_{кр}$  можно разложить на составляющие: нормальную  $P_{кр}^N$  к



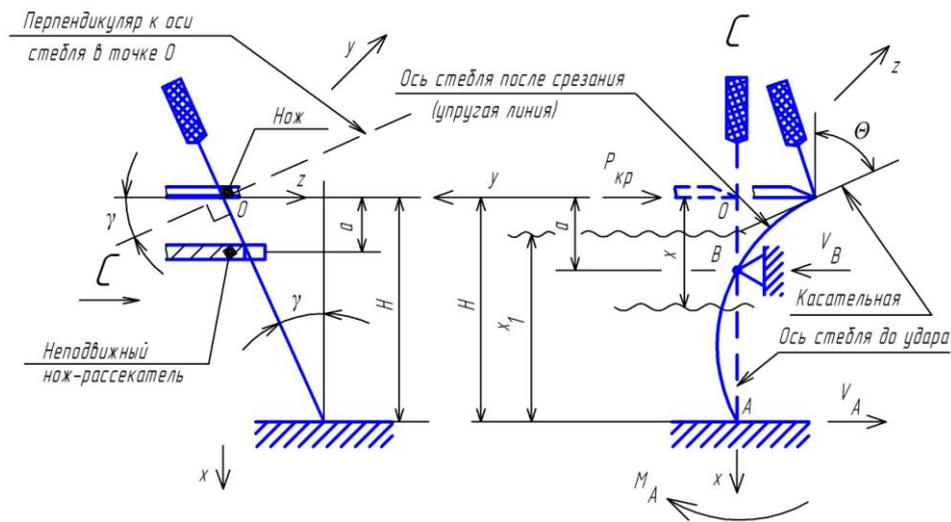


Рисунок 4 — Схема стрелы прогиба стебля от воздействия критической силы при подпорном резании.

Мощность, потребляемую при бесподпорном резании для прямого и криволинейного вогнутого лезвия, представим в виде:

$$N_{рез} = \left\{ \frac{s \cdot H^2 \left\{ \delta \cdot \sigma_p + \frac{E \cdot h_{сж}^2}{2l_{ср}} \left[ \operatorname{tg} \beta + f_{мп} \cdot \sin^2 \beta + \mu (2f_{мп} + \cos^2 \beta) \right] \right\} + 0,00052 \Theta \cdot E \cdot \pi \cdot d^4 \cdot K \cdot n \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}{K \cdot n \cdot H^2 \cdot \cos \alpha} \right\} \times \times r \cdot \cos \tau \cdot \pi \cdot n (1 + k \cdot \operatorname{tg}^2 \tau) , \quad (1)$$

где  $s$  - подача, м/с;  $H$  - высота резания, м;  $\delta$  - толщина (острота) лезвия, м;  $\sigma_p$  - нормальные (контактные) разрушающие напряжения, возникающие в перерезаемом стебле, Н/м<sup>2</sup>;  $E$  - модуль упругости стебля при растяжении, Н/м<sup>2</sup>;  $h_{сж}$  - толщина перерезаемого слоя материала, сжатого лезвием, до момента начала резания, м;  $\beta$  - угол наклона фаски лезвия, град.;  $f_{мп}$  - коэффициент трения массы о материал лезвия;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $l_{ср}$  - длина дуги траектории лезвия в срезаемом материале в точке приложения сосредоточенной силы, заменяющей распределённую нагрузку на лезвии, м;  $\Theta$  - угол отклонения стебля в направлении перемещения ножа при резании;  $\pi = 3,14$  - отношение длины окружности к её диаметру;  $d$  - диаметр стебля, м;  $K$  - число ножей;  $n$  - частота вращения диска с ножами, мин<sup>-1</sup>;  $\gamma$  - угол отклонения стебля от вертикали в направлении подачи, град.;  $\varphi$  - угол трения между лезвием ножа и материалом, град.;  $\alpha$  - угол между активной частью лезвия ножа и линией, соединяющей ось вращения диска и центр поперечного сечения стебля в плоскости среза при наиболее нагруженной позиции активного участка лезвия, град.;  $k$  - коэффициент пропорциональности.

Мощность, потребляемую при бесподпорном резании для лезвия с насечкой, представим в виде:

$$N_{рез} = \left\{ \frac{1,17s \cdot H^2 \left\{ \delta \cdot \sigma_p + \frac{E \cdot h^2}{2l_{cp}} \left[ \operatorname{tg} \beta + f_{mp} \cdot \sin^2 \beta + \mu (2f_{mp} + \cos^2 \beta) \right] \right\} + 0,00052 \Theta \cdot E \cdot \pi \cdot d^4 \cdot K \cdot n \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}{K \cdot n \cdot H^2 \cdot \cos \alpha} \right\} \times \\ \times r \cdot \cos \tau \cdot \pi \cdot n (1 + k \cdot \operatorname{tg}^2 \tau) . \quad (2)$$

Мощность, потребляемую при подпорном резании для прямого и криволинейного вогнутого лезвия, представим в виде:

$$N_{рез} = \left\{ \frac{960s \left\{ \delta \cdot \sigma_p + \frac{E \cdot h^2}{2l_{cp}} \left[ \operatorname{tg} \beta + f_{mp} \cdot \sin^2 \beta + \mu (2f_{mp} + \cos^2 \beta) \right] \right\} \left[ 2H^2 - \cos \gamma (2H^2 - aH + a^2) \right] + \Theta \cdot E \cdot \pi \cdot d^4 \cdot K \cdot n \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}{960K \cdot n \cdot \cos \alpha \left[ 2H^2 - \cos \gamma (2H^2 - aH + a^2) \right]} \right\} \times \\ \times r \cdot \cos \tau \cdot \pi \cdot n (1 + k \cdot \operatorname{tg}^2 \tau) , \quad (3)$$

Мощность, потребляемую при подпорном резании для лезвия с насечкой, представим в виде:

$$N_{рез} = \left\{ \frac{1123s \left\{ \delta \cdot \sigma_p + \frac{E \cdot h^2}{2l_{cp}} \left[ \operatorname{tg} \beta + f_{mp} \cdot \sin^2 \beta + \mu (2f_{mp} + \cos^2 \beta) \right] \right\} \left[ 2H^2 - \cos \gamma (2H^2 - aH + a^2) \right] + \Theta \cdot E \cdot \pi \cdot d^4 \cdot K \cdot n \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}{960K \cdot n \cdot \cos \alpha \left[ 2H^2 - \cos \gamma (2H^2 - aH + a^2) \right]} \right\} \times \\ \times r \cdot \cos \tau \cdot \pi \cdot n (1 + k \cdot \operatorname{tg}^2 \tau) . \quad (4)$$

Проведённый расчёт показал, что значения мощности потребляемой на резание ножами с прямым лезвием, при прочих равных условиях, до 7 % получаются меньше, чем ножами с радиусным вогнутым лезвием и до 20 % меньше, чем ножами с насечкой. Это объясняется тем, что у ножей с прямым лезвием угол между активной частью лезвия ножа и линией, соединяющей ось вращения диска и центр поперечного сечения стебля в плоскости среза при наиболее нагруженной позиции активного участка лезвия  $\alpha$ , а также угол скольжения лезвия  $\tau$  меньше, чем у ножей с радиусным вогнутым лезвием и насечкой. Кроме того, от стебля на насечённый нож, по сравнению с рассматриваемыми ножами, передаётся большее усилие, так как основание зуба насечённого лезвия воспринимает большую нагрузку из-за перераспределения силового потока с возрастанием от вершины зуба к основанию.

При подпорном резании кукурузы и подсолнечника мощность резания при прочих постоянных условиях меньше, чем при бесподпорном. При подпорном резании кукурузы мощность уменьшается на 36-75% по сравнению с бесподпорным резанием, а подсолнечника на 44-66%. Это объясняется тем, что высота резания при подпорном резании уменьшает нормальную составляющую критической силы резания больше, чем при бесподпорном. При резании стеблей кустарниковой поросли клёна

наблюдается обратный процесс – при бесподпорном резании потребляемая энергия меньше, чем при подпорном. Объясняется это большей жёсткостью стеблей кустарниковой поросли клёна, которая в сотни раз больше, чем у кукурузы и подсолнечника.

Схема работы ротационно-дискового режущего аппарата представлена в соответствии с рисунком 5. Принимая всю длину лезвия АС за активный элемент ножа (условно принимая, что ножи не встречают посторонних препятствий, которые они не могут срезать с первого раза и не отклоняются в шарнирах пропуская их), получим площадку, ограниченную двумя трохоидами 1, со срезанными стеблями. Из рисунка видно, что соседнее лезвие DE срежет стебли на площадке, ограниченной трохоидами 2.

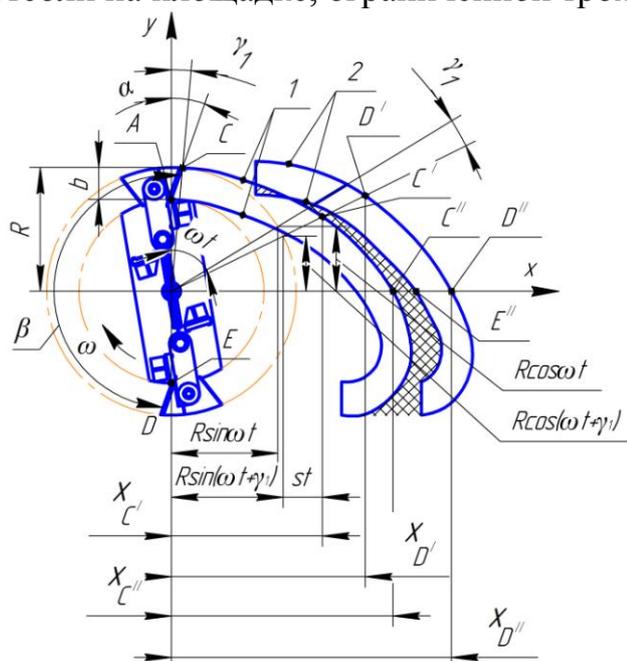


Рисунок 5 - Схема работы ротационно-дискового режущего аппарата

Верхняя заштрихованная площадка, ограниченная трохоидами обоих ножей, определяет площадь холостой работы второго ножа, так как стебли, которые стояли на этой площадке, были срезаны первым ножом. На рисунке 5 также показана площадка (заштрихованная крестообразно), ограниченная трохоидами 1 и 2, на которой стебли не будут срезаны.

Напишем уравнения движения для точки С:

$$\begin{cases} x_{C'} = st + R \cdot \sin(\omega t + \gamma_1); \\ y_{C'} = R \cdot \cos(\omega t + \gamma_1); \\ z_{C'} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения движения для точки D:

$$\begin{cases} x_{D'} = st' + R \cdot \sin(\beta + \omega t + \gamma_1); \\ y_{D'} = R \cdot \cos(\beta + \omega t + \gamma_1); \\ z_{D'} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Нескошенной площадки не будет, если

$$b = \frac{60s}{n} - 2R \cdot \cos \gamma_1 . \quad (7)$$

$$K = \frac{2\pi}{\arccos \left( \frac{\frac{s}{\omega} \cdot 2\pi - R \cos \gamma_1}{b - R} \right)} . \quad (8)$$

Чтобы лезвие работало всей своей длиной, необходимо соблюсти условие:

$$\frac{v_o}{s} \geq \frac{\pi R}{\Delta s \cdot \cos \alpha} , \quad (9)$$

где  $v_o$  - окружная скорость, м/с;  $\Delta s$  - длина активной части лезвия, м.

**В третьей главе «Экспериментальные исследования»** дано описание измерительной аппаратуры, экспериментальной установки, методики исследований и обработки экспериментальных данных. Получены уравнения регрессии мощности, потребляемой при резании толстостебельных культур. Определены факторы, значимо влияющие на процесс резания толстостебельных культур. Установлены общие закономерности изменения мощности, находящиеся в функциональной зависимости от параметров ротационно-дискового режущего аппарата и определены рациональные параметры ротационно-дискового режущего аппарата толстостебельных культур.

Для отыскания оптимального сочетания выделенных факторов, дающего минимальную величину показателя потребляемой мощности, были проведены полные факторные эксперименты типа  $2^5$ -для подсолнечника и кукурузы и  $2^6$ -для кустарниковой поросли клёна, а также выполнена программа крутого восхождения методом Бокса-Уилсона по поверхности отклика, состоящая из 22 опытов. Нужно уточнить, что в качестве параметра оптимизации применительно к подсолнечнику и кукурузе нами принята энергия, потребляемая при резании, отнесённая к эталонному диаметру стеблей, а не к единице перерезаемой площади, как обычно, так как такой показатель требует учёта диаметра стебля, что неоправданно усложняет модель процесса. В качестве размерного эталона нами приняты стебель кукурузы диаметром 25 мм и стебель подсолнечника диаметром 23 мм: эти размеры встречаются наиболее часто. При резании кустарниковой поросли клёна в зону резания попадают различные диаметры стеблей и поэтому интерес вызывает энергоёмкость резания поросли клёна различных диаметров. В связи с этим в уравнение регрессии мощности, потребляемой при резании стеблей кустарниковой поросли клёна, введён дополнительный шестой фактор «диаметр стебля».

При проведении опытов использовались подсолнечник сорта «Енисей», кукуруза сорта «Буковинский» и кустарниковая поросль клёна.

Экспериментальные исследования процесса резания толстостебельных культур проводились в испытательной лаборатории опытного цеха ОАО «Алтайсельмаш-запчасть».

Схема экспериментальной установки изображена в соответствии с рисунком 6.

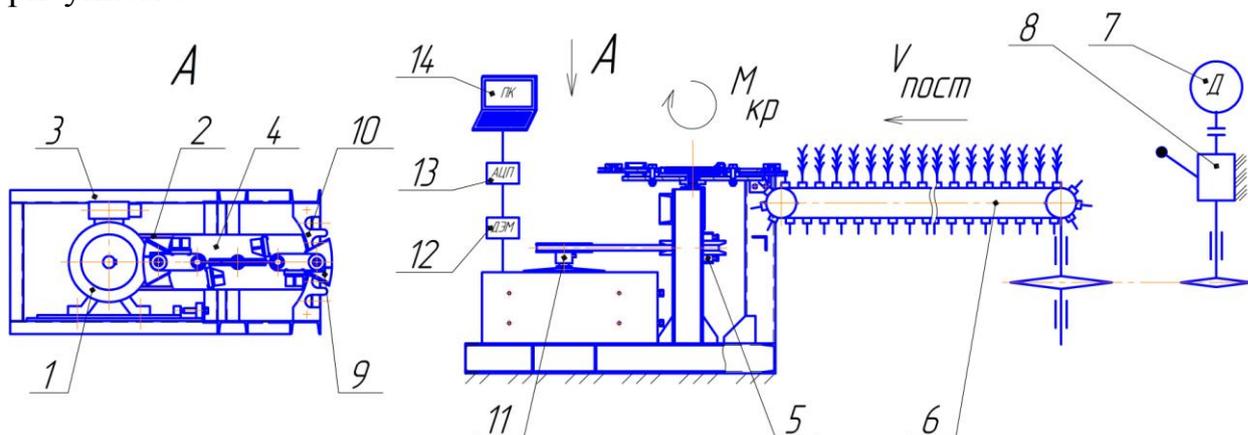


Рисунок 6 - Схема экспериментальной установки: 1-электродвигатель привода установки; 2-ременная передача; 3-рама; 4-ротационно-дисковый режущий аппарат; 5-вариатор; 6-конвейер; 7-электродвигатель механизма подачи; 8-коробка передач; 9-нож; 10-нож-рассекатель; 11-шкив; 12-датчик электрической мощности; 13-аналого-цифровой преобразователь; 14-ноутбук.

Привод вала режущего аппарата осуществляется от электродвигателя 1 мощностью 10 кВт с частотой вращения вала  $1493 \text{ мин}^{-1}$  через ременную передачу 2. Установка крепится на раме 3. Для изменения частоты вращения аппарата 4 на валу установки закреплён вариатор 5 с раздвижными конусами, с помощью которого частота вращения режущего аппарата изменялась в пределах  $1200\text{-}1500 \text{ мин}^{-1}$  через каждые  $100 \text{ мин}^{-1}$ .

Стебли культур подавались к режущему аппарату с помощью конвейера 6. На конвейере смонтированы сменные ячейки из труб на расстоянии 150 мм друг от друга. Сменные ячейки позволили обеспечить отклонение стеблей от вертикали в диапазоне от 0 до  $28^{\circ}$ . Конвейер приводится в движение электродвигателем 7 мощностью 5,5 кВт с частотой вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и цепной передачей. Поступательная скорость грузонесущего органа конвейера изменялась с помощью коробки передач 8. В результате обеспечивались следующие скорости подачи стеблей: 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 м/с. В эксперименте участвовали три вида ножей: с прямой линией лезвия; с криволинейной вогнутой линией лезвия; с насечённой криволинейной вогнутой линией лезвия. Зазор между подвижными ножами и неподвижным ножом-рассекателем равен 2 мм. На цепи, питающей электродвигатель режущего аппарата, установлен датчик электрической мощности 12, электрический сигнал с которого передаётся в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 13. Аналоговый сигнал с датчика в АЦП преобразуется в цифровой код и передаётся в ноутбук 14. В последнем с

помощью программы регистрации измеренных величин проводится обработка цифрового кода и осуществляется запись в памяти. Потребляемая энергия резания определялась как разность потребляемых энергий рабочего и холостого ходов. Фиксация значений потребляемой энергии рабочего хода велась при установившемся режиме работы, то есть через 5-6 секунд после начала подачи стеблей.

За критерий оптимизации  $y_1$  принята величина показателя потребляемой мощности при резании подсолнечника, за критерий оптимизации  $y_2$  принята величина показателя потребляемой мощности при резании кукурузы,  $y_3$  - при резании кустарниковой поросли клёна.

Уравнения регрессии в натуральном виде с учётом только значимых коэффициентов примут вид:

$$\begin{aligned} &\text{для подсолнечника} \\ N_{рез} = &0,759 - 0,043Pr + 4,38s + 0,113L_n - 0,00018n - 0,01928571\gamma - \\ &- 0,153Pr \cdot L_n - 0,0022s \cdot n + 0,03214286s \cdot \gamma ; \end{aligned} \quad (10)$$

где Pr — принцип среза (при бесподпорном резании Pr = +1, при подпорном Pr = -1);  $L_n$  — форма линии лезвия ножа (при радиусном вогнутом лезвии с насечкой  $L_n = +1$ , при радиусном вогнутом лезвии  $L_n = 0$ , при прямом лезвии  $L_n = -1$ ).

$$\begin{aligned} &\text{для кукурузы} \\ N_{рез} = &0,649 - 0,078Pr + 4,65s - 0,004L_n - 0,00008n - 0,022\gamma + 0,14Pr \cdot L_n + \\ &+ 0,003Pr \cdot \gamma + 0,2L_n \cdot s - 0,0024s \cdot n + 0,032s \cdot \gamma ; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &\text{для кустарниковой поросли клёна} \\ N_{рез} = &82,16 - 29,672Pr - 0,28s + 0,6717L_n - 0,025015n - 1,788714\gamma - 1,8472d - \\ &- 2,54Pr \cdot s - 0,288Pr \cdot L_n + 0,00313Pr \cdot n + 0,347143Pr \cdot \gamma + 0,5856Pr \cdot d + 0,62L_n \cdot s - \\ &- 0,002225s \cdot n + 0,098214s \cdot \gamma + 0,0505s \cdot d - 0,000675L_n \cdot n + 0,009214L_n \cdot \gamma + \\ &+ 0,00025n \cdot \gamma + 0,000516n \cdot d + 0,034771\gamma \cdot d \end{aligned} \quad (12)$$

Анализ полученных уравнений регрессии показал, что с уменьшением подачи, частоты вращения диска, диаметра стеблей и с увеличением отклонения стебля от вертикали расход мощности снижается. Минимальная мощность резания получена при прямой форме лезвия ножей, максимальная - при лезвиях с насечкой.

Для повышения наглядности результатов, полученных при проведении опытов, выполнена геометрическая интерпретация поверхностей отклика в зависимости от подачи и частоты вращения диска, а также от подачи и отклонения стебля от вертикали при зафиксированных значениях остальных факторов на уровнях соответствующих наименьшему значению потребляемой мощности. Изолинии поверхностей отклика для подсолнечника изображены в соответствии с рисунком 7, для кукурузы в соответствии с рисунком 8.

На функцию отклика кустарниковой поросли клёна наибольшее влияние при заданных интервалах оказывают факторы «Диаметр стебля»,

«Принцип среза» и «Отклонение стебля от вертикали». Геометрическая интерпретация поверхностей отклика для кустарников клёна в зависимости от конструктивных и технологических параметров при зафиксированных

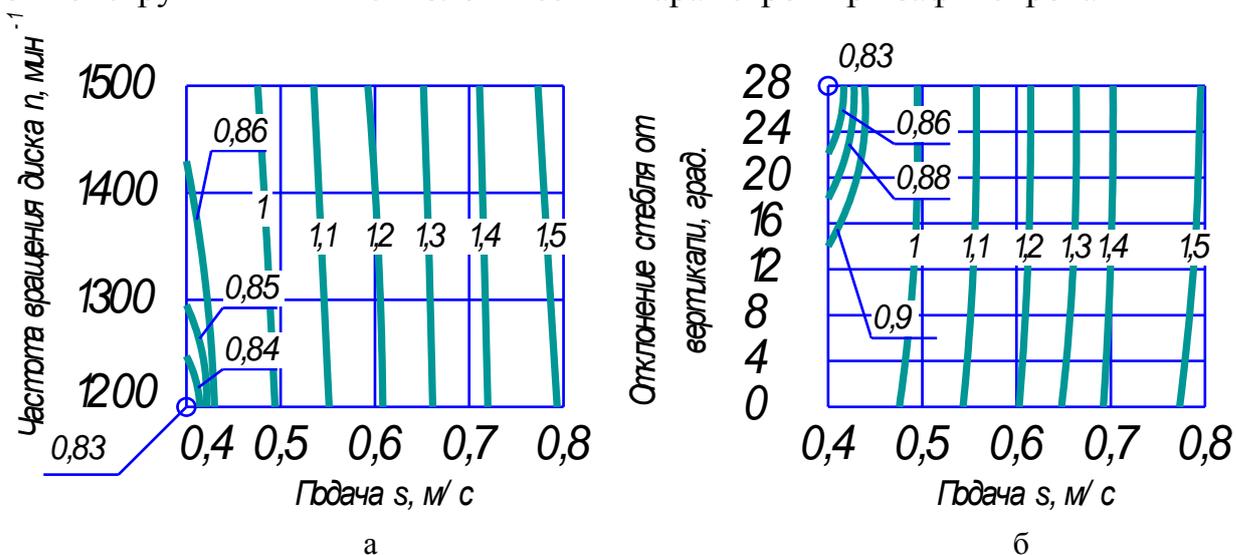


Рисунок 7 - Геометрическая интерпретация поверхностей отклика методом крутого восхождения для подсолнечника: а — поверхность отклика в зависимости от изменения подачи и частоты вращения диска при подпорном резании ножами с прямыми лезвиями и отклонением стебля от вертикали  $28^{\circ}$ ; б — поверхность отклика в зависимости от изменения подачи и отклонения стебля от вертикали при подпорном резании ножами с прямыми лезвиями и частотой вращения диска  $1200 \text{ мин}^{-1}$ .

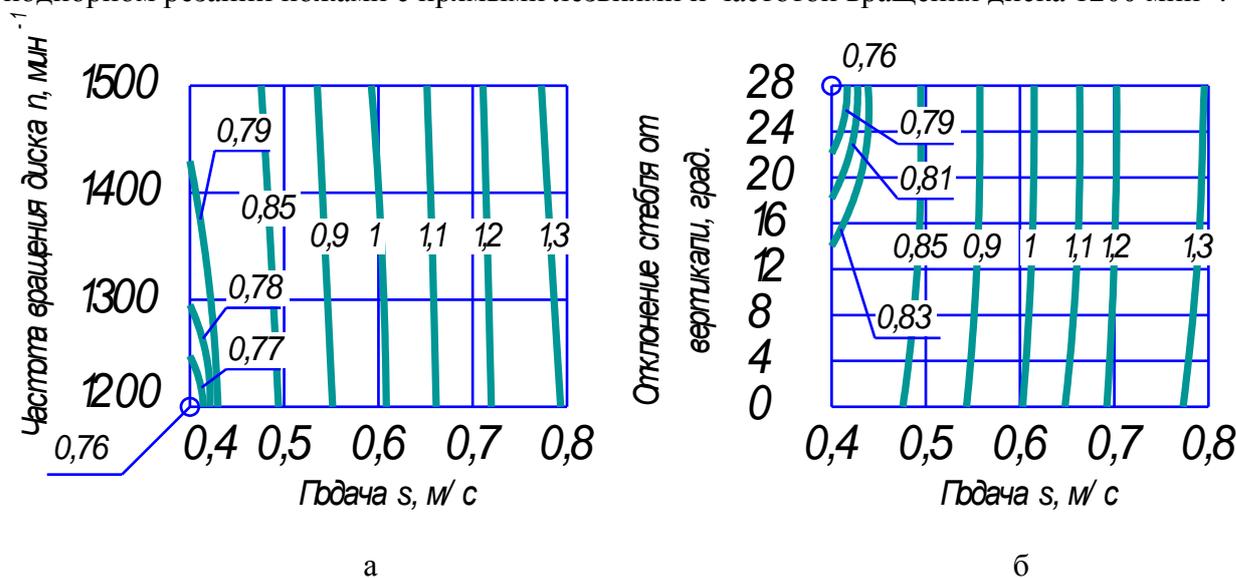


Рисунок 8 - Геометрическая интерпретация поверхностей отклика методом крутого восхождения для кукурузы: а — поверхность отклика в зависимости от изменения подачи и частоты вращения диска при подпорном резании ножами с прямым лезвием и отклонением стебля от вертикали  $28^{\circ}$ ; б — поверхность отклика в зависимости от изменения подачи и отклонения стебля от вертикали при подпорном резании ножами с прямым лезвием и частотой вращения диска  $1200 \text{ мин}^{-1}$ .

значениях остальных факторов на уровнях соответствующих наименьшему значению потребляемой мощности представлена на рисунке 9.

Влияние факторов на функцию отклика можно выявить, давая

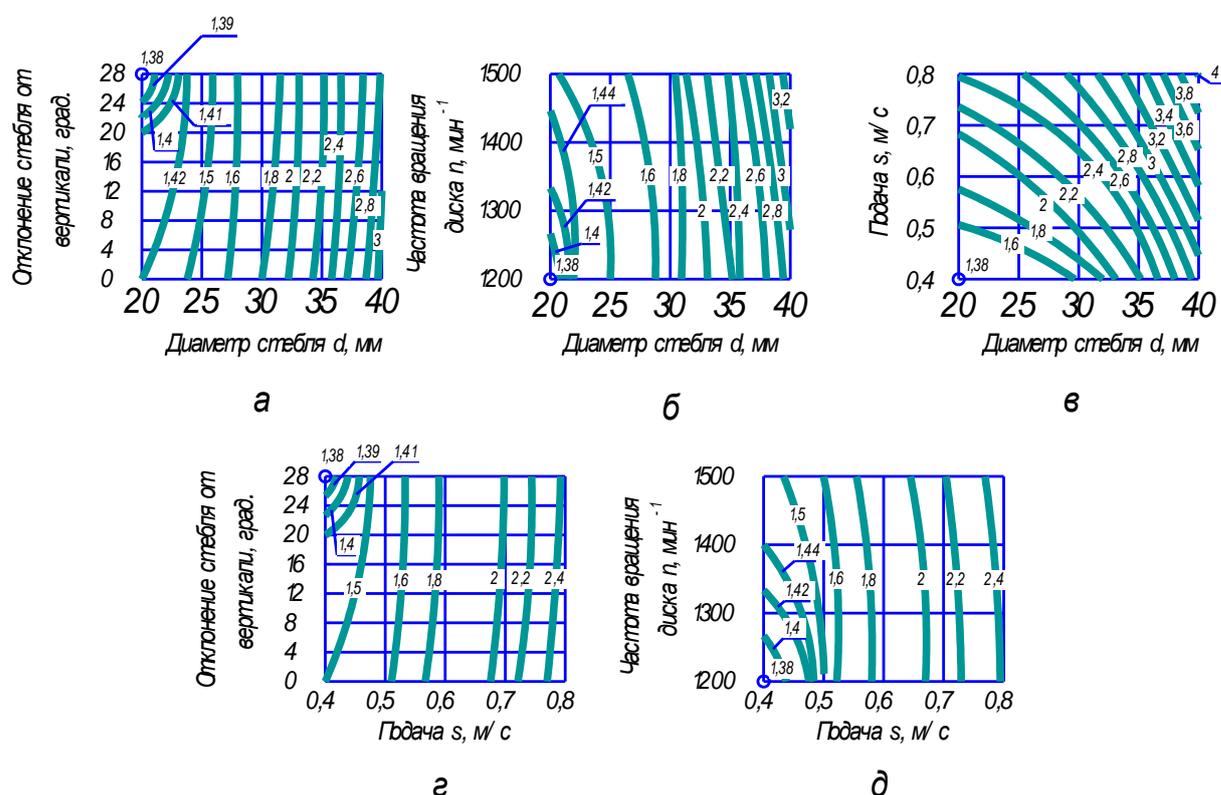


Рисунок 9 - Геометрическая интерпретация поверхностей отклика методом крутого восхождения для кустарниковой поросли клёна: а — поверхность отклика в зависимости от изменения диаметра стебля и отклонения стебля от вертикали при бесподпорном резании ножами с прямым лезвием с подачей 0,4 м/с и частотой вращения 1200 мин<sup>-1</sup>; б — поверхность отклика в зависимости от изменения диаметра стебля и частоты вращения диска при бесподпорном резании ножами с прямым лезвием с подачей 0,4 м/с и отклонением стебля от вертикали 28<sup>0</sup>; в — поверхность отклика в зависимости от изменения диаметра стебля и подачи при бесподпорном резании ножами с прямым лезвием с частотой вращения 1200 мин<sup>-1</sup> и отклонением стебля от вертикали 28<sup>0</sup>; г — поверхность отклика в зависимости от изменения подачи и отклонения стебля от вертикали при бесподпорном резании стеблей диаметром 20 мм ножами с прямым лезвием с частотой вращения 1200 мин<sup>-1</sup>; д — поверхность отклика в зависимости от изменения подачи и частоты вращения диска при бесподпорном резании стеблей диаметром 20 мм ножами с прямым лезвием и отклонением стебля от вертикали 28<sup>0</sup>.

приращения некоторым из них при фиксированных значениях остальных. Таким образом, получены графические зависимости мощности, потребляемой на резание от каждого из факторов. Фиксирование факторов производилось на уровнях, соответствующих наименьшему значению мощности для каждой из рассматриваемых культур.

Анализируя графическую зависимость  $N_{рез} = f(s, n)$  подсолнечника в соответствии с рисунком 10, видим, что факторы «Подача» и «Частота вращения диска» в значительной степени влияют на потребляемую мощность резания. С уменьшением значений факторов, участвующих в резании, потребляемая энергия процесса снижается. Характер зависимости линейный. Наименьшему значению мощности, потребляемой на резание подсолнечника, будет соответствовать подача 0,4 м/с и частота вращения

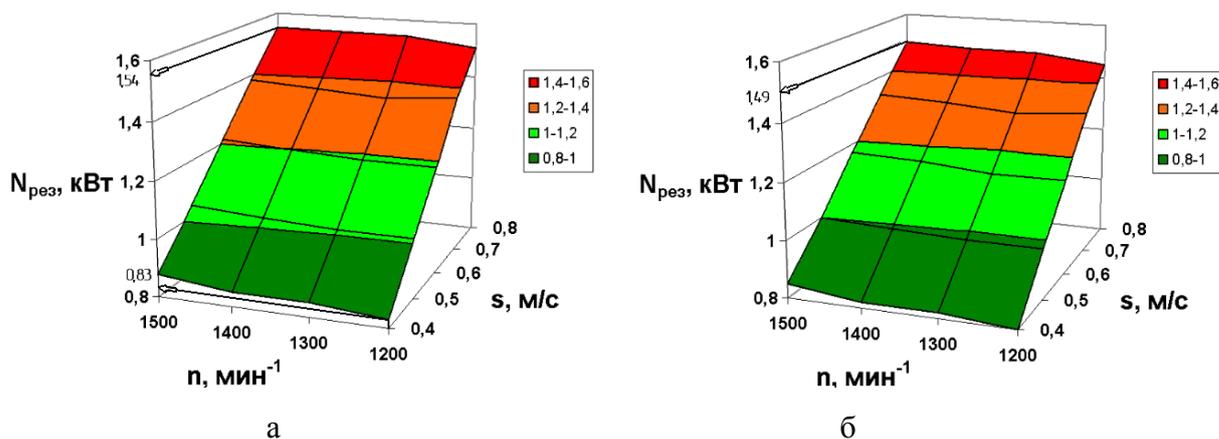


Рисунок 10 — Зависимость мощности  $N_{рез}$ , потребляемой на резание стеблей подсолнечника, от подачи  $s$  и частоты вращения диска  $n$ : а — экспериментальная; б — теоретическая

1200 мин<sup>-1</sup>. При подпорном резании ножами с прямой линией лезвия и углом входа стеблей в зону резания 28° снижение подачи с 0,8 до 0,4 м/с и числа оборотов с 1500 до 1200 мин<sup>-1</sup> приводит к снижению потребляемой мощности на 2–46 %. Это обусловлено уменьшением проекции активной части лезвия на линию, соединяющую ось вращения диска и центр поперечного сечения стебля в плоскости среза при снижении подачи и частоты вращения.

Рассматривая графическую зависимость  $N_{рез} = f(s, n)$  кукурузы в соответствии с рисунком 11, видим, что факторы «Подача» и «Частота вращения диска» в значительной степени влияют на потребляемую мощность резания. С уменьшением значений факторов, участвующих в резании, потребляемая мощность процесса снижается. Характер зависимости линейный. Наименьшему значению мощности, потребляемой на резание кукурузы, будет соответствовать подача 0,4 м/с и частота вращения 1200 мин<sup>-1</sup>. При подпорном резании ножами с прямой линией лезвия и углом входа стеблей в зону резания 28° снижение подачи с 0,8 до 0,4 м/с и числа оборотов с 1500 до 1200 мин<sup>-1</sup> приводит к снижению потребляемой мощности на 3–45 %.

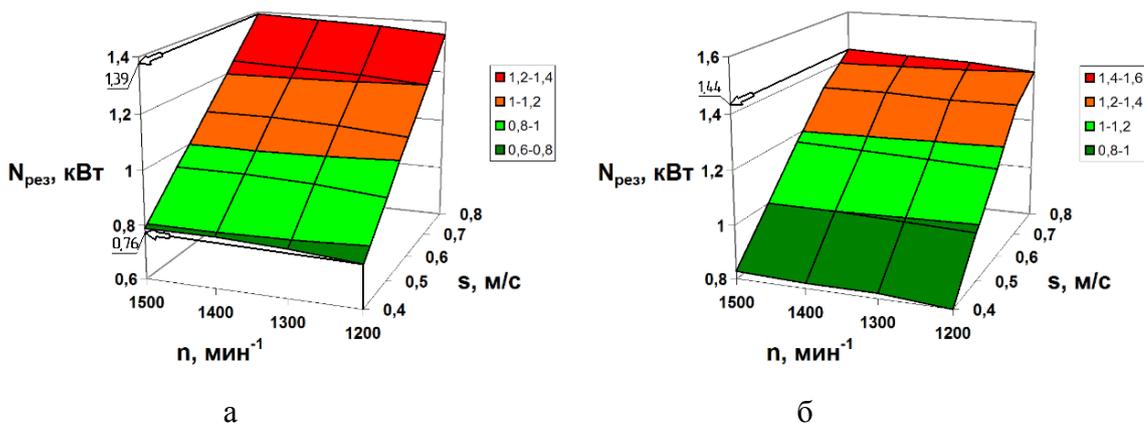


Рисунок 11 — Зависимость мощности  $N_{рез}$ , потребляемой на резание стеблей кукурузы, от подачи  $s$  и частоты вращения диска  $n$ : а — экспериментальная; б — теоретическая

Анализируя графическую зависимость  $N_{рез} = f(d, \gamma)$  кустарниковой поросли клёна в соответствии с рисунком 12, видим, что фактор «Диаметр

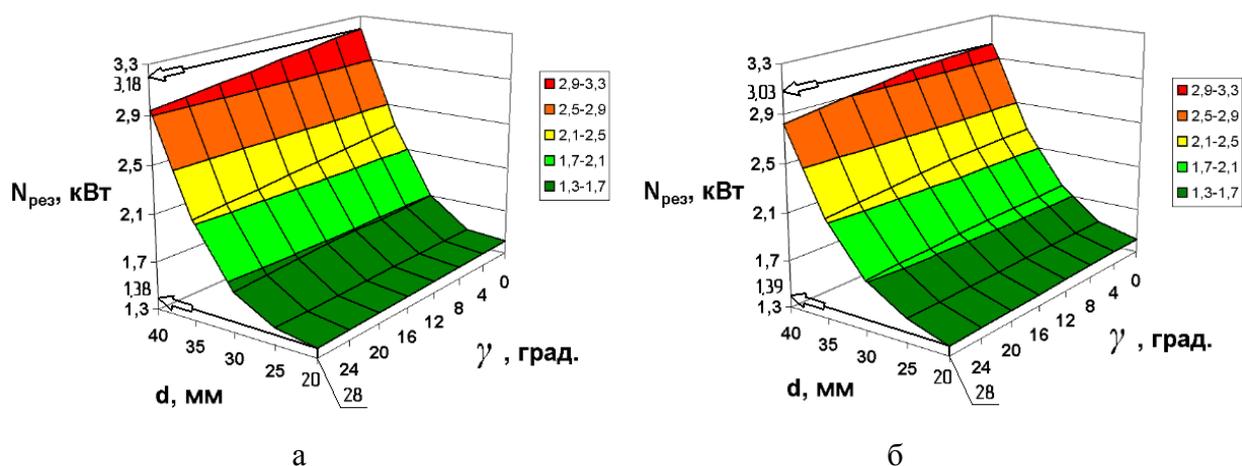


Рисунок 12 — Зависимость мощности  $N_{рез}$ , потребляемой на резание кустарниковой поросли клёна, от диаметра  $d$  стебля и отклонения стебля от вертикали  $\gamma$ : а — экспериментальная; б — теоретическая

стебля» в более значительной степени влияет на потребляемую мощность резания, чем фактор «Отклонение стебля от вертикали». Зависимость имеет форму параболы. Наименьшему значению мощности, потребляемой на резание кустарниковой поросли клёна, будет соответствовать уровень фактора «Диаметр стебля» 20 мм и уровень фактора «Отклонение стебля от вертикали»  $28^{\circ}$ , наибольшему — соответственно 40 мм и  $0^{\circ}$ . При бесподпорном резании ножами с прямой линией лезвия, подачей 0,4 м/с и числом оборотов диска  $1200 \text{ мин}^{-1}$  уменьшение диаметров стеблей с 40 до 20 мм и увеличение угла отклонения стебля от вертикали с  $0^{\circ}$  до  $28^{\circ}$  приводит к снижению потребляемой мощности на 2–56 %.

**В четвёртой главе «Методика инженерного расчёта и экономическая эффективность использования аппарата»** разработана методика инженерного расчёта ротационно-дискового режущего аппарата, как при подпорном, так и при бесподпорном резании. В методику входят формулы определяющие параметры ножей режущего аппарата, а так же формулы для определения энергии, потребляемой при резании толстостебельных культур.

Использование предлагаемого режущего аппарата ротационно-дискового типа толстостебельных культур позволит получить экономический эффект в сфере производства и эксплуатации, приходящийся на срок службы предлагаемого режущего аппарата в сумме 742,6 тыс. руб. по сравнению с навесной косилкой – кусторезом ЕМ-1,3 (в ценах 2013 г.).

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследование режущих аппаратов толстостебельных культур позволило выявить характер и особенности процессов резания, а так же оценить конструктивно-технологические схемы существующих режущих

аппаратов и оценить эффективность рабочих органов различных конструкций.

На основании проведённого анализа режущих аппаратов обоснована схема аппарата, имеющего шарнирно подвешенные ножи, способные при перегрузках отклоняться от радиального положения; гребнеобразный нож-рассекатель; форму ножа, исключая случайный выход материала из зоны резания и обеспечивающая затягивание стеблей в эту зону; механизм, ускоряющий возврат державки с ножом в рабочее положение.

2. Представлена схема движения ножей диска относительно перерезаемых стеблей с уравнениями (5-9) движения точек ножей. Полученные уравнения позволяют определить необходимые значения подачи, частоты вращения, активной длины лезвия и числа ножей. Также представлены траектория лезвий ножей, которой соответствует наименьший расход потребляемой энергии и траектория лезвий ножей режущего аппарата с наименьшими затратами потребляемой энергии на единицу длины активной части лезвия для испытываемых культур. Наименьшее значение мощности, потребляемой на единицу длины активной части лезвия при резании подсолнечника составит 1,5 кВт, кукурузы — 1,35 кВт со следующими факторами: резание подпорное, частота вращения — 1200 мин<sup>-1</sup>, подача — 0,8 м/с, форма линии лезвий ножей — прямая, наклон стеблей 28°. Наименьшее значение мощности, потребляемой на единицу длины активной части лезвия, при резании стеблей кустарниковой поросли клёна средним диаметром 20 мм составит 2,5 кВт, 25 мм — 4,35 кВт, 30 мм — 6,5 кВт, 35 мм — 10,16 кВт, со следующими факторами: резание бесподпорное, частота вращения диска — 1200 мин<sup>-1</sup>, подача — 0,8 м/с, форма линии лезвий ножей — прямая, наклон стеблей 28°. Стебли кленовой поросли диаметром 40 мм при указанных параметрах аппарат перерезать не смог.

3. Выведены формулы (1-4) мощности потребляемой при резании ножами с прямым, радиусным вогнутым, насечённым лезвиями при подпорном и бесподпорном резании.

Экспериментально исследовано 3 типа ножей с разными лезвиями. Самым энергоэкономичным является нож с прямым лезвием со следующими основными факторами: угол заточки 23°, толщина лезвия 4 мм, зазор между подвижным ножом и неподвижным ножом-рассекателем 2 мм.

Получены уравнения регрессии мощности (10–12), потребляемой при резании стеблей кукурузы, подсолнечника и кустарниковой поросли клёна.

Выявлены наиболее значимые факторы – это: подача, принцип среза, частота вращения диска и диаметр стебля. Наибольшее расхождение между теоретическими и опытными данными получено при резании кустарниковой поросли клёна — 5%.

Экспериментальным способом установлено, что:

– значения мощности потребляемой на резание ножами с прямым лезвием, при прочих равных условиях, до 7 % получаются меньше, чем

ножами с радиусным вогнутым лезвием и до 20 % меньше, чем ножами с насечкой. Это объясняется тем, что у ножей с прямым лезвием угол между кромкой лезвия ножа и направлением подачи стеблей при наиболее нагруженной позиции активной части лезвия, а также угол скольжения лезвия меньше, чем у ножей с радиусным вогнутым лезвием и насечкой. Кроме того, от стебля на насечённый нож, по сравнению с рассматриваемыми ножами, передаётся большее усилие, так как основание зуба насечённого лезвия воспринимает большую нагрузку из-за перераспределения силового потока с возрастанием от вершины зуба к основанию;

– при подпорном резании кукурузы и подсолнечника мощность резания при прочих постоянных условиях меньше, чем при бесподпорном. При подпорном резании кукурузы мощность уменьшается на 36–75% по сравнению с бесподпорным резанием, а подсолнечника на 44–66%. Это объясняется тем, что высота резания при подпорном резании уменьшает нормальную составляющую критической силы резания больше, чем при бесподпорном. При резании стеблей кустарниковой поросли клёна наблюдается обратный процесс – при бесподпорном резании потребляемая энергия меньше на 33–89 %, чем при подпорном. Объясняется это большей жёсткостью стеблей кустарниковой поросли клёна, которая в сотни раз больше, чем у кукурузы и подсолнечника;

– с уменьшением подачи от 0,8 м/с до 0,4 м/с, при остальных равных условиях, мощность, потребляемая при резании стеблей кукурузы, снижается на 28–40%, при резании стеблей подсолнечника на 35–37 %, стеблей кустарниковой поросли клёна на 4 %. Изменение носит у подсолнечника и кукурузы линейный характер;

– с уменьшением частоты вращения с 1500 мин<sup>-1</sup> до 1200 мин<sup>-1</sup>, при прочих равных обстоятельствах, мощность, потребляемая при резании кукурузы и подсолнечника, снижается на 6 %; мощность, потребляемая при резании кустарниковой поросли клёна, снижается на 20 %. Изменение носит линейный характер;

– с увеличением угла наклона стеблей от вертикали от 0° до 28°, при равных остальных условиях, мощность, потребляемая при резании кукурузы, снижается на 13 %, при резании подсолнечника на 14 %, при резании кустарниковой поросли клёна на 19 %. Мощность, потребляемая при резании, снижается линейно;

– с уменьшением диаметра стеблей кустарниковой поросли клёна от 40 мм до 20 мм, при прочих равных условиях, мощность резания снижается нелинейно.

Определены рациональные параметры ротационно-дискового режущего аппарата толстостебельных культур:

для стеблей подсолнечника и кукурузы (минимальная мощность, потребляемая при резании стеблей подсолнечника 0,83 кВт; минимальная мощность, потребляемая при резании стеблей кукурузы 0,76 кВт при отклонении стеблей данных культур от вертикали 28°) — принцип среза

подпорный, подача 0,4 м/с, форма лезвия ножа прямая, частота вращения диска 1200 мин<sup>-1</sup>;

для стеблей кустарниковой поросли клёна (минимальная потребляемая мощность 1,38 кВт при отклонении стеблей от вертикали 28° и диаметре стебля 20 мм) — принцип среза бесподпорный, подача 0,4 м/с, форма лезвия ножа прямая, частота вращения диска 1200 мин<sup>-1</sup>.

Затраты энергии, потребляемой при резании рассматриваемых культур, отражаются в следующей последовательности по растениям в сторону увеличения: кукуруза, подсолнечник, кустарниковая поросль клёна.

4. Разработана методика инженерного расчёта ротационно-дискового режущего аппарата, как при подпорном, так и при бесподпорном резании. В методику входят формулы определяющие параметры ножей режущего аппарата, а также формулы для определения мощности потребляемой при резании толстостебельных культур.

5. Использование предлагаемого режущего аппарата ротационно-дискового типа толстостебельных культур позволит получить экономический эффект в сфере производства и эксплуатации, приходящийся на срок службы предлагаемого режущего аппарата в сумме 742,6 тыс. руб. по сравнению с навесной косилкой – кусторезом ЕМ-1,3 (в ценах 2013 г.).

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Будашов, И. А. Мощность резания ротационно-дискового измельчителя толстостебельных культур / И. А. Будашов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2011. — №2(123). — С. 167-170.

2. Будашов, И. А. Влияние основных параметров ротационно-дискового измельчителя на мощность резания подсолнечника / И. А. Будашов // Тракторы и сельхозмашины. — 2011. — №7. — С. 39-40.

3. Будашов, И. А. Влияние основных параметров ротационно-дискового измельчителя на мощность измельчения кукурузы / И. А. Будашов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. — 2011. — №24. — С. 352-356.

4. Будашов, И. А. Влияние основных параметров ротационно-дискового измельчителя на мощность измельчения кустарниковой поросли клёна / И. А. Будашов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. — 2011. — №25. — С. 217-222.

5. Будашов, И. А. Исследование траектории движения лезвий ножей ротационно-дискового измельчителя относительно перерезаемых стеблей / И. А. Будашов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2011. — №5(79). — С. 81-84.

6. Будашов, И. А. Нормальная составляющая критической силы резания при подпорном и бесподпорном измельчении толстостебельных культур ножами дискового измельчителя / А. К. Фокеев, И. А. Будашов //

Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Том 11. — №6(57). — С. 826-832.

7. Будашов, И. А. Влияние основных параметров измельчителя толстостебельных культур на мощность / А. К. Фокеев, И. А. Будашов // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Том 11. — №7(58). — С.1025-1034.

**Статьи в сборниках научных трудов:**

8. Будашов, И. А. Измельчение толстостебельных культур / И. А. Будашов // Труды Рубцовского индустриального института: Выпуск 8: Технические науки, Под ред. Кутышкина А. В. / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск: РИО, 2001. – С.78-86.

9. Будашов, И. А. Ротационно-дисковый измельчитель толстостебельных культур: энергоёмкость эксплуатации / И. А. Будашов // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сб. тезисов всероссийской научно-технической конференции 23-24 ноября 2006 г. / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2006. -С.50-52.

10. Будашов, И. А. Рациональные параметры ротационно-дискового режущего аппарата при резании толстостебельных культур / Н. А. Чернецкая, И. А. Будашов // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Материалы II Всероссийской научно-технической конференции 23-24 ноября 2012 г. / Под ред. к. т. н. доцента А. В. Шашка / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2012. - С. 176-179.