

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет
имени В.М. Кокова»

На правах рукописи



Габачиев Джамалдин Тамирланович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ
ДЛЯ КРЕСТЬЯНСКИХ (ФЕРМЕРСКИХ) ХОЗЯЙСТВ**

Специальность: 4.3.1 –
Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса
(технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Ю.А. Шекихачев

Нальчик – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ В КРЕСТЬЯНСКИХ (ФЕРМЕРСКИХ) ХАЗЯЙСТВАХ.....	10
1.1 Состояние и перспективы развития малых форм хозяйствования в сельскохозяйственном производстве Кабардино-Балкарской Республики...	10
1.2 Основные способы и классификация технических средств механического измельчения грубых кормов.....	16
1.3 Анализ конструкций измельчителей грубых стебельных кормов.....	22
1.4 Обзор исследований процесса измельчения грубых стебельных кормов.....	34
1.5 Выводы. Цель и задачи исследования.....	46
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ.....	49
2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых толстостебельных кормов.....	49
2.2 Общая модель взаимодействия рабочего органа измельчителя с измельчаемым материалом.....	50
2.3 Математическое моделирование процесса взаимодействия рабочего органа измельчителя с грубыми толстостебельными кормами.....	55
2.4 Определение дальности полета частицы измельченного материала...	66
2.5 Выводы.....	72
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....	73
3.1 Программа, методика экспериментальных исследований, описание экспериментальной установки и измерительная аппаратура.....	73
3.2 Физико-механические свойства измельчаемого материала.....	88

3.3 Влияние частоты вращения подающего транспортера на равномерность подачи измельчаемого материала к рабочим органам измельчителя.....	90
3.4 Влияние числа оборотов основного вала с режущими ножами и относительной влажности исходного материала на производительность измельчителя.....	91
3.5 Оптимизация основных параметров и режима работы измельчителя грубых толстостебельных кормов.....	93
3.6 Определение механической характеристики рабочего механизма привода измельчителя.....	102
3.7 Выводы.....	111
4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из приоритетных направлений «Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия до 2025 г.» определено развитие малых форм хозяйствования.

В результате реализации данной программы в Кабардино-Балкарской Республике (КБР) организованы более 3 тыс. крестьянских (фермерских) хозяйств, в том числе свыше 800 семейных животноводческих ферм, что позволило увеличить урожайность сельхозкультур и поголовье сельскохозяйственных животных.

При этом семейные фермы и крестьянские (фермерские) хозяйства столкнулись с проблемой выбора машин, позволяющих измельчать грубые корма, при минимальных энергозатратах.

Для приготовления кормов в условиях малых форм хозяйствования отечественные производители сельхозтехники предлагают измельчители, предназначенные в основном для измельчения стеблей злаковых культур: сена, соломы и трав. Основным их недостатком является высокая удельная энергоемкость процесса измельчения. Для измельчения толстостебельных грубых кормов на рынке представлены измельчители китайского производства, которые имеют сложную конструкцию и высокую удельную энергоемкость.

В связи с этим разработка новой конструктивно-технологической схемы измельчителя для семейных ферм и крестьянских (фермерских) хозяйств, позволяющей измельчать толстостебельные грубые корма при минимальных энергозатратах, является актуальной

Работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ в рамках государственной «Программы фундаментальных и приоритетных прикладных исследований по научному обеспечению развития АПК РФ до 2025 г.».

Степень разработанности темы. Большой вклад в разработку и совершенствование теории измельчения грубых кормов и технических средств внесли В. П. Горячкин, В. А. Желиговский, О. Г. Ангилеев, Г. И. Бремер, В. Ю. Фролов, А. В. Бурмага, А. Н. Глобин, А. Р. Демидов, В. Л. Кирпичев, А. М. Кукта, М. Ф. Кулик, Л. Б. Левинсон, Г. Г. Маслов, С. В. Мельников, Н. Е. Резник, Н. С. Сергеев, В. И. Сыроватка, Е. И. Трубилин, и другие.

Разработкой измельчителей грубых кормов для крестьянских (фермерских) хозяйств в разное время занимались В. Р. Алешкин, А. Ф. Башков, Д. И. Грицай, А. В. Рамзаев, Н. Ю. Сарбатова, Д. П. Сысоев, М. И. Туманова и другие.

Данная работа дополняет эти исследования путем обоснования параметров и режима работы измельчителя, позволяющего измельчать толстостебельные грубые корма с минимальными энергозатратами.

Рабочая гипотеза – повысить качество измельчения грубых толстостебельных кормов и снизить энергоемкость измельчения возможно за счет использования двух параллельно расположенных валов, на цилиндрической поверхности которых по всей длине выточены ножи, выполненные в виде зубьев, входящие в зацепление с друг другом и вращающиеся в разные стороны, с разными угловыми скоростями.

Цель работы – обоснование параметров и режимов работы измельчителя грубых толстостебельных кормов для снижения энергоемкости процесса измельчения.

Объекты исследования – технологический процесс измельчения грубых толстостебельных кормов и опытный образец измельчителя.

Предмет исследования – закономерности, связывающие геометрические параметры и кинематический режим работы измельчителя толстостебельных кормов с показателями удельной энергоемкости.

Задачи исследования.

1. Провести конструктивно-технологический анализ измельчителей грубых толстостебельных кормов с обоснованием перспективного направления их совершенствования.

2. Разработать конструктивно-технологическую схему измельчителя, позволяющую измельчать грубые толстостебельные корма при минимальных энергетических затратах.

3. Провести теоретические исследования рабочего процесса измельчителя грубых толстостебельных кормов и определить факторы, влияющие на производительность и энергоемкость измельчения.

4. Разработать опытный образец измельчителя грубых толстостебельных кормов.

5. Оптимизировать конструктивно-режимные параметры измельчителя по критерию энергоемкости.

6. Оценить экономическую эффективность использования предлагаемого измельчителя грубых толстостебельных кормов.

Научную новизну работы составляют:

- аналитические зависимости, позволяющие установить силы, действующие на измельчаемый материал; работу и мощность, затрачиваемую на процесс резания, производительность и степень измельчения грубых толстостебельных кормов; взаимосвязь между физико-механическими характеристиками грубых толстостебельных кормов и основными конструктивно-режимными параметрами измельчителя, а также пределы изменения этих параметров, оказывающие наибольшее влияние на энергоемкость измельчения;

- регрессионные зависимости энергоемкости измельчителя грубых толстостебельных кормов от геометрических параметров и режимов работы.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическую значимость работы представляют: аналитические зависимости работы измельчителя грубых толстостебельных кормов, позволяющие обосновать основные кинематические и геометрические параметры измельчителя; методика инженерного расчета основных параметров измельчителя; регрессионные зависимости энергоемкости измельчителя грубых толстостебельных кормов от геометрических параметров и режимов работы,

позволяющее обосновать его основные геометрические, кинематические параметры и режим работы.

Практическую значимость работы представляют: конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых толстостебельных кормов, которая позволяет разработать техническое решение конструкции измельчителя, позволяющего измельчать грубые толстостебельные корма при минимальных энергетических затратах; опытный образец измельчителя грубых толстостебельных кормов; соотношение между параметрами и режимами работы измельчителя с показателями производительности и энергоемкости, обеспечивающее рациональный процесс измельчения грубых толстостебельных кормов.

Техническая новизна предложенного конструктивного решения подтверждена патентом РФ № 168572 на полезную модель.

Методы исследований. Теоретические исследования проведены с использованием основных положений высшей математики и теоретической механики. Экспериментальные исследования проведены с использованием теории планирования многофакторного эксперимента. Опыты проведены в лабораторных условиях с использованием апробированных методик. Опытные данные обрабатывались с использованием пакета программ MathCad 7 и Microsoft Excel 2010.

Основные положения, выносимые на защиту:

- конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых толстостебельных кормов, включающая две параллельно расположенные валы, на цилиндрической поверхности которых по всей длине выточены ножи, выполненные в виде зубьев, входящие в зацепление с друг другом и вращающиеся в разные стороны с разными угловыми скоростями;
- аналитические зависимости, описывающие процесс работы измельчителя грубых толстостебельных кормов, позволяющие обосновать основные конструктивно-режимные параметры измельчителя;

- результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров и режима работы измельчителя грубых толстостебельных кормов.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований приняты К(Ф)Х «Апеков Алим Нарикович» (с.п. Анзорей, Лескенский район, КБР) и К(Ф)Х «Инжижоков Заурби Муаедович» (с.п. Аргудан, Лескенский район, КБР) для практического применения.

Степень достоверности и апробация работы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: результаты получены с применением известных методик проведения исследований, современной измерительной и вычислительной техники; установлено качественное и количественное совпадение теоретических и экспериментальных данных с результатами, представленными в независимых источниках.

Основные положения работы доложены и обсуждены на: Международной НПК «Энергетическая, экологическая и продовольственная безопасность: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Нальчик, 2022 г.); X Международной НПК «Реализация приоритетных программ развития АПК» (г. Нальчик, 2022 г.); Всероссийской (национальной) НПК «Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства» (г. Нальчик, 2021 г.); VII Международной НПК «Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность» (г. Нальчик, 2021 г.); International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019»; XII Международной НПК «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК», в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016» (г. Ставрополь, 2016 г.).

Опытный образец измельчителя грубых кормов демонстрировался на: IX выставке инновационных проектов молодых ученых Северного Кавказа, посвященной дню Российской науки (Нальчик 2015 г.); 17-ой Международной выставке «Агроуниверсал-2015» (Ставрополь, 2015 г.); Всероссийском конкурсе на

лучшую научную работу студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений МСХ РФ (Нальчик, 2015 г.); выставке научно-технических и инновационных достижений III молодежного фестиваля науки (Ставрополь, 2015 г.); Всероссийском конкурсе фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «УМНИК» (Нальчик, 2015 и 2016 г.г.); X Выставке инновационных проектов молодых ученых Северного Кавказа, посвященная дню Российской науки (Нальчик, 2016 г.); Молодежном бизнес-форуме «Точка Роста. Места силы» (Нальчик, 2016 г.); Всероссийском конкурсе инновационных студенческих работ в области механизации (Москва, 2016 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 научных работах: 4 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ; 1 патент РФ на полезную модель; 7 статей в прочих изданиях. Общий объем опубликованных работ составил 4,88 п.л., из них личный вклад автора 3,91 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация содержит: введение, четыре раздела, заключение, список использованных источников и приложения. Работа изложена на 148 страницах, включая 57 рисунков, 23 таблицы и 11 приложений. Список использованных источников включает 144 наименования, в том числе 8 на иностранном языке.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ В КРЕСТЬЯНСКИХ (ФЕРМЕРСКИХ) ХОЗЯЙСТВАХ

1.1 Состояние и перспективы развития малых форм хозяйствования в сельскохозяйственном производстве Кабардино-Балкарской Республики

Развитие малых форм хозяйствования в сельской местности является важнейшим условием обеспечения устойчивости развития сельских территорий. В частности, в КБР на 01.01.2024 г. действуют 16,9 тыс. К(Ф)Х и ИП, свыше 141 тыс. личных подсобных хозяйств [54]. За К(Ф)Х и ИП в КБР. были закреплены 171,7 тыс. га сельхозугодий (рисунок 1.1, таблица 1.1) (59,2% от все занятой площади) [54].

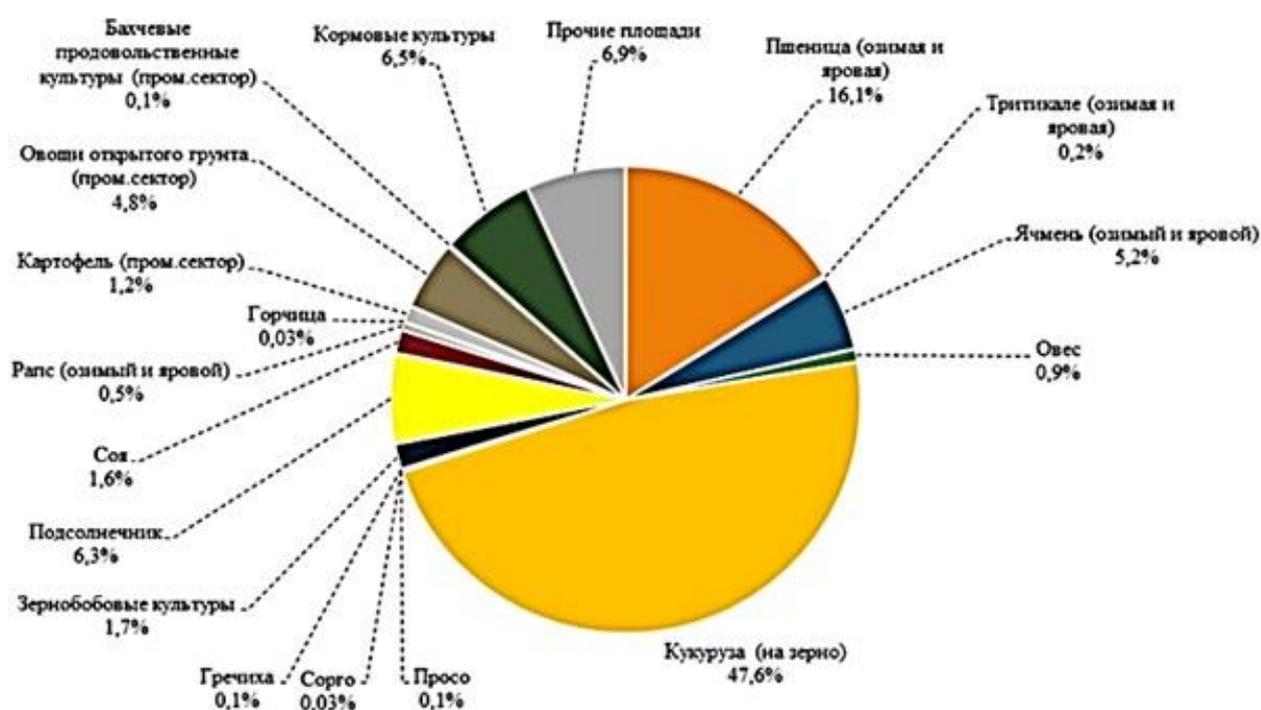


Рисунок 1.1 – Структура посевных площадей в Кабардино-Балкарской Республике (общий размер площадей – 290,0 тыс. га)

Таблица 1.1 – Посевные площади в 2023 г. по видам с.-х. культур и категориям хозяйств

Категории хозяйств	Культуры								Вся посевная площадь	
	зерновые и зернобобовые		технические		картофель и овоще-бахчевые		кормовые			
	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%	тыс. га	%
Хозяйства всех категорий	208,3	100,0	30,1	100,0	34,7	100,0	16,9	100,0	290,0	100,0
СХО	83,6	40,1	16,7	55,5	7,7	22,2	10,3	61,0	118,3	40,8
Хозяйства населения	1,7	0,8	0,1	0,3	17,6	50,7	0,2	1,2	19,6	6,8
К(Ф)Х и ИП	123,0	59,1	13,3	44,2	9,4	27,1	6,4	37,9	152,1	52,4

Валовой сбор зерновых и зернобобовых культур в 2023 г., включая кукурузу, составил 1,2 млн. т (105% к уровню 2019 г.) (таблица 1.2) [54]. В К(Ф)Х и ИП получено 68,6% от всего валового сбора.

Таблица 1.2 – Производство видов продукции растениеводства в 2023 г. (все категории хозяйств)

Наименование показателя	Единица измерения	Факт. 2023г.	Факт. 2019 г.	% 2023 г. к 2019 г.
Зерновые и зернобобовые	тыс. т	1136,1	1126,7	109
Картофель	тыс. т	196	176,1	111
Плоды и ягоды	тыс. т	349,4	225,76	154
Овощи	тыс. т	404,3	436,27	92
Закладка многолетних насаждений	тыс. га	1,4	1,8	77,8

Урожайность зерновых и зернобобовых культур в 2023 г. в К(Ф)Х и у ИП составила 64,8 ц/га, что выше на 16,5% среднего показателя в КБР (таблица 1.3) [108].

Таблица 1.3 – Урожайность основных видов с.-х. культур по категориям хозяйств в 2023 г., ц/га

Наименование культуры	Категории хозяйств			Хозяйства всех категорий	
	СХО	хозяйства населения	К(Ф)Х и ИП	2019 г.	2023 г.
Зерновые и зернобобовые	44,3	47,8	64,8	45,8	55,6
Подсолнечник	17,6	14,7	21,0	14,6	19,2
Картофель	339,6	157,0	211,6	168,8	175,5
Овощи	257,3	193,7	184,4	188,7	211,7

Для устойчивого развития К(Ф)Х и животноводства принята программа «Развитие семейных животноводческих ферм на базе крестьянских (фермерских) хозяйств в Кабардино-Балкарской Республике». В рамках данной Программы под семейной животноводческой фермой подразумевается ферма, находящаяся в собственности и/или пользовании К(Ф)Х, созданного в соответствии с Федеральным законом от 11.06.2003 г. № 74-ФЗ «О крестьянском (фермерском) хозяйстве», члены которого связаны родством и/или свойством и совместно осуществляют в сфере сельского хозяйства производственную и иную хозяйственную деятельность, основанную на их личном участии.

В результате реализации данной программы созданы 213 новых семейных животноводческих ферм на базе К(Ф)Х в КБР, что позволила увеличить поголовье сельскохозяйственных животных (таблица 1.4), объем производства мяса всех видов сельскохозяйственных животных и птиц, надои молока (таблица 1.5).

Для развития отрасли животноводства и улучшения генофонда в КБР завозятся чистопородные животные.

Основной целью государственной политики в области животноводства является улучшение кормовой базы животноводства, обеспечение сбалансированного кормления животных. Для этого КБР располагает благоприятными природно-климатическими условиями.

Таблица 1.4 – поголовье сельскохозяйственных животных в 2023 г. (все категории хозяйств)

Поголовье, тыс. голов	2023 г.	2019 г.	2023 г. в % к 2019 г.
Крупный рогатый скот,	271,2	268,6	101
в т. ч. коровы	134,8	132,9	101,4
Овцы и козы	393	383,9	102,4
Свиньи	3,6	3,46	104
Птица (млн. голов)	3,527	3,887	90,7

Таблица 1.5 – Производство мяса и молоко в хозяйствах в 2023 г. (все категории хозяйств)

Наименование показателя	Единица измерения	2023 г.	2019 г.	2023 г. в % к 2019 г.
Мясо	тыс. т	119,6	112,1	106,7
Молоко	тыс. т	537,5	514,4	104,5
Яйца	млн. шт.	237	130,1	103

В перспективе, мясное скотоводство должно получить основное свое развитие в горных и предгорных районах республики и некоторых хозяйствах степной зоны.

На территории КБР расположены высокогорные пастбища: Безенги-Дыхтау, Хулам, Ботхал, Тызыл, Хасау-бат, Башиль, Сукан, Уяна-тюб, Аурсентх, Кая-арты, Теплан, обладающие разнообразным и богатым травяным покровом, позволяющим содержать на них большое количество скота

При зимнем содержании основным кормом для скота являются грубые корма: сено, солома, стебли кукурузы, корзинки подсолнечника и т.д.

Приготовление кормов – важнейшая задача в животноводстве. Требования к приготовлению кормов зачастую определяют степень их измельчения, загрязненность, наличие вредных примесей.

Зоотехнические требования к размерам частиц корма устанавливают длину резки соломы и сена для коров (3-4 см), лошадей (1,5-2,5 см). Корнеклубнеплоды для коров должны иметь толщину резки 1,5 см (молодняка 0,5-1 см). Жмых для

коров подвергается дроблению (размер частиц при этом 10-15 мм). К размерам частиц измельченных концентрированных кормов предъявляются следующие требования: для коров – 1,8-1,4 мм.

Отличительная особенность грубых кормов – большое содержание клетчатки, лигнина, провитаминов, витаминов и других биологически активных веществ.

По ботаническому составу различается сено злаковое, бобовое, бобово-злаковое, разнотравное [16, 60, 103].

Норма скармливания сена для телят 3-6 кг сена, лактирующих коров – 8-10 кг. Сено – единственный корм для стельных сухостойных коров [64, 103].

В структуре урожая кукурузы стебли и стержни занимают около 20%. При использовании в качестве корма для КРС их размалывают (2-3 см) и смешивают с другими компонентами (40-50%) [14, 55, 56, 59, 93].

Размолотыми корзинками подсолнечника кормят КРС (норма 3-4 кг на 1 гол./сут.), молодняк до 1 года (норма 2-2,5 кг) [57, 61, 65].

Грубые корма обязательно должны присутствовать в рационе сельскохозяйственных животных. Клетчатка, которой в грубом корме содержится 25-45%, оказывает благотворное влияние на пищеварительные процессы.

Основным способом заготовки грубых (стебельных) кормов к хранению является прессование (рисунок 1.2) [115].

Подготовка грубых кормов предполагает главным образом измельчение с целью повысить поедаемость и улучшить технологические свойства.

Энергоемкость процесса измельчения, материалоемкость и качество измельчения зависят от физико-механических свойств грубых стебельных кормов (таблица 1.6) [9, 17]. Анализ показал, что увеличение влажности приводит к росту энергоемкости процесса их измельчения и снижению степени измельчения [9, 17, 44].

Существенной физико-механической характеристикой грубых стебельных кормов является структура. Разные сельскохозяйственные растения имеют

разнообразные по строению стебли, которые зависят от их биологических и морфологических особенностей [9, 17, 44, 101].



а)



б)

Рисунок 1.2 – Заготовка сена (соломы) в тюках (а) и рулонах (б)

Таблица 1.6 – Физико-механические свойства грубых стебельных кормов

Вид корма	Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Угол естественного откоса, град.
Сено рассыпное	15-17	60-85	50-60
Солома (рассыпная)	15-17	45-85	
Сено, солома (прессованное)	12-17	250-290	
Соломенная сечка (рассыпная)	12-16	30-50	
Зеленая свежескошенная масса:			
рожь	73-77	280-350	47-49
овес	78-80	280-330	50-55
кукуруза	78-80	300-350	53-55
Кукурузный силос (рассыпной)	72-80	600-750	45-53
Травяной сенаж (рассыпной)	50-55	300-350	45-55

Стебельные корма относятся к упруго-вязкопластическим материалам с выраженной анизотропией и значительными изменениями прочностных свойств в зависимости от физического состояния [114, 115].

В процессе переработки сельхозпродукции имеют место сопутствующие отходы в виде стеблей, стержней кукурузы и пр., обладающие различными физико-механическими свойствами (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Физико-механические свойства стеблей

Корма	Диаметр стеблей на высоте среза, м		Высота стеблей, м		Удельная работа резания, Дж/м ² ·10 ³	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
Толстостебельные	0,015	0,05	1,0	5,0	5,9	23,6
Тонкостебельные	0,005	0,01	0,5	3,0	5,9	23,6
Травы	0,002	0,015	0,3	0,8	3,9	21,6

В процессе их переработки К(Ф)Х, ИП и личные хозяйства сталкиваются с проблемой выбора машины, позволяющего измельчать толстостебельные грубые корма: стебли, стержни и початки кукурузы, стебли и корзинки подсолнечника при минимальных энергозатратах.

1.2 Основные способы и классификация технических средств механического измельчения грубых кормов

Без предварительной подготовки сельскохозяйственным животным можно скормить сено, отвечающее предъявляемым требованиям к его качеству. Предварительному измельчению в обязательном порядке подлежат грубые стебельные корма [15, 16].

При измельчении напряжение от внешних сил превышает напряжения молекулярных сил сцепления внутри материала [2, 6, 9, 10, 12, 17, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 80, 90, 93, 100, 105, 107, 110, 112, 115, 128].

Механическое измельчение грубых кормов (рисунок 1.3) предполагает резание [41, 48].

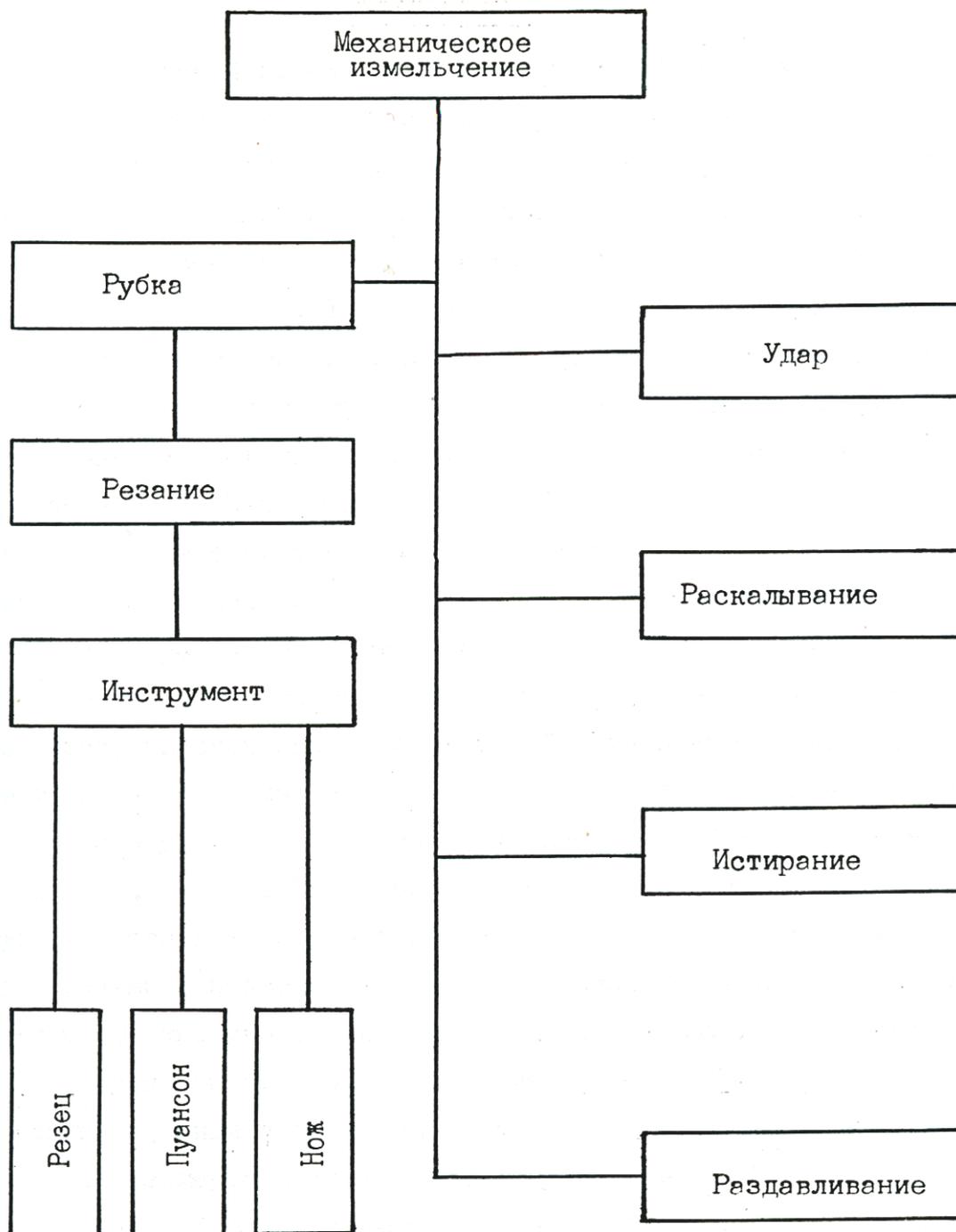
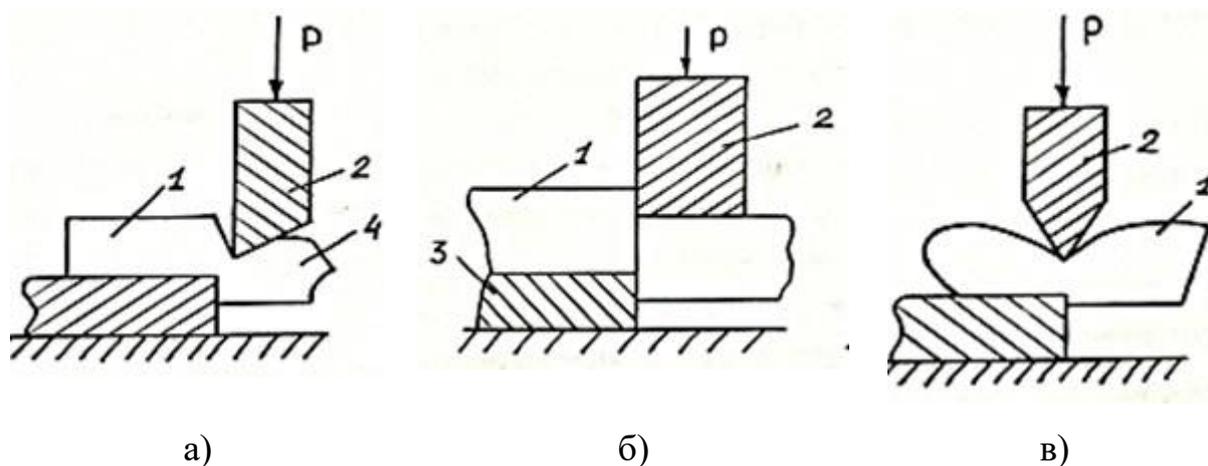


Рисунок 1.3 – Способы механического измельчения кормов

Резание – менее всего энергоемкий процесс при измельчении кормов [67, 68]. Сухое кормовое сырье по физико-механическим свойствам можно сравнить с абразивным материалом. Поэтому требуемая долговечность кромок ножей достигается с большими затратами. Это обстоятельство является причиной ограниченного применения данного способа.

Частный случай измельчения – процесс резания лезвием, который обладает рядом особенностей. Фундаментальной основой теории резания являются труды В. П. Горячкина [38], В. А. Желиговского [48, 49] и др.

Резание бывает пуансоном, резцом и лезвием [48, 49, 79, 93, 117] (рисунок 1.4).



а – резец; б – пуансоном; в – лезвием

Рисунок 1.4 – Виды резания

Резец 2 (рисунок 1.4, а) при внедрении в основном своими гранями в измельчаемый материал 1 под воздействием силы P отделяет стружку 4.

При перемещении пуансона 2 (рисунок 1.4, б) под действием силы P в измельчаемом материале 1 создаются поверхности среза, которые проходят через режущее ребро пуансона и противорежущее ребро матрицы 3.

При резании лезвием (рисунок 1.4, в) разрушение материала 1 происходит, в основном, в результате действия вершины двухгранного угла. Вид резания

определяется видом лезвия и характером его движения при разрушении материала. Резание может быть нормальным, наклонным и скользящим.

В случае нормального резания вектор силы, которая приложена к ножу, ориентирован также, как и вектор скорости движения ножа. Его направление – перпендикулярно к обрабатываемой поверхности.

В случае наклонного резания разрушение материала происходит, в основном, в результате непосредственного действия вершины двухгранного угла. При этом резание предваряет процесс уплотнения материала. Эффект скольжения имеет место благодаря уменьшению фактического угла заточки лезвия (рисунок 1.5).

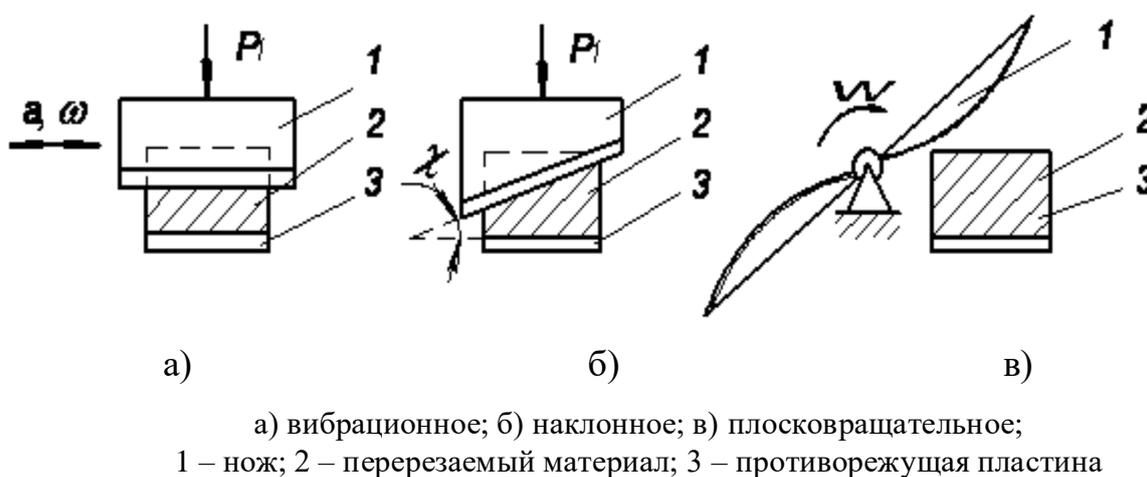


Рисунок 1.5 – Виды резания со скольжением

Таким образом, резание может быть вибрационным, наклонным и плосковращательным.

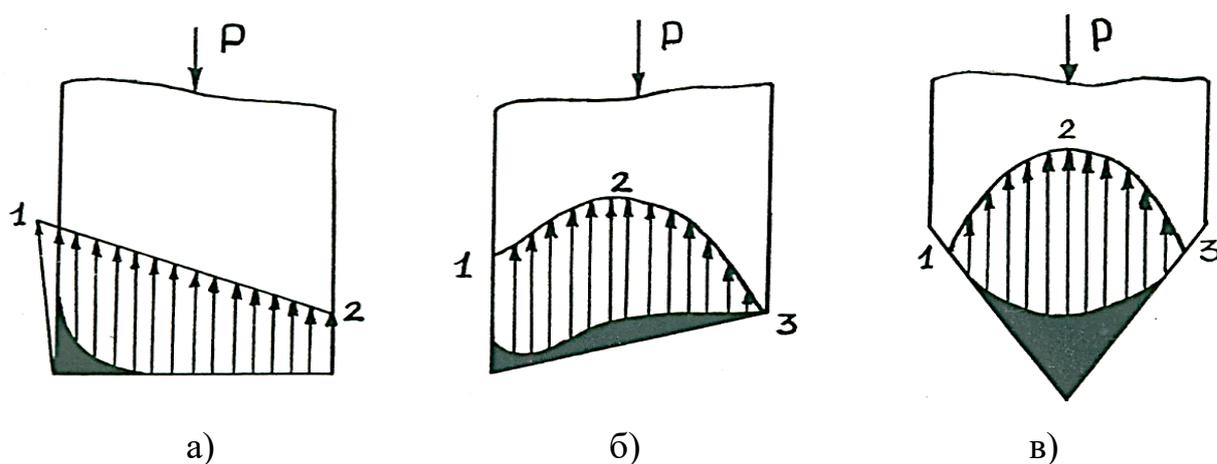
При наклонном и плосковращательном резании скольжение материала относительно ножа имеет место, когда значение угла раствора режущей пары превышает угол трения обрабатываемого материала о материал лезвия. Если значение угла раствора режущей пары меньше угла трения обрабатываемого материала о материал лезвия, то имеет место рубящее резание.

Виды резания различаются тем, что при воздействии пуансона и резца новая поверхность материала образуется в результате того, что возникают внутренние

касательные напряжения, а при резании лезвием образование этой поверхности происходит в результате непосредственного давления кромки резца [88].

В случае резания пуансоном (рисунок 1.6, а) форма элементарных реакций – прямая, резцом (рисунок 1.6, б) – выпуклая кривая.

В случае резания лезвием максимальная реакция 2 имеет место на кромке (рисунок 1.6, в).



а – пуансоном; б – резцом; в – лезвием

Рисунок 1.6 – Эпюры элементарных реакций при различных видах резания:

В современных конструкциях измельчителей грубых кормов рабочие органы совершают поступательное, вращательное, возвратно-поступательное и колебательное движения [2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 14, 17, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 39, 40, 41, 42, 47, 49, 51, 52, 59, 62, 63, 66, 67, 71, 73, 76, 77, 78, 80, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 91, 94, 96, 98, 99, 102, 104, 105, 106, 107, 109, 111, 113, 114, 125, 126].

Для совершенствования конструкции измельчителей толстостебельных кормов можно использовать классификацию, предложенную Сыроевым Д.П. (рисунок 1.7) [99, 114, 115, 116, 127, 130].

Выгрузку кормов осуществляют пневматическим, механическим способами и самотеком [115].

Наиболее перспективными для семейных крестьянских (фермерских) хозяйств являются измельчители, передающие крутящий момент исполнительным механизмам посредством электрического привода.

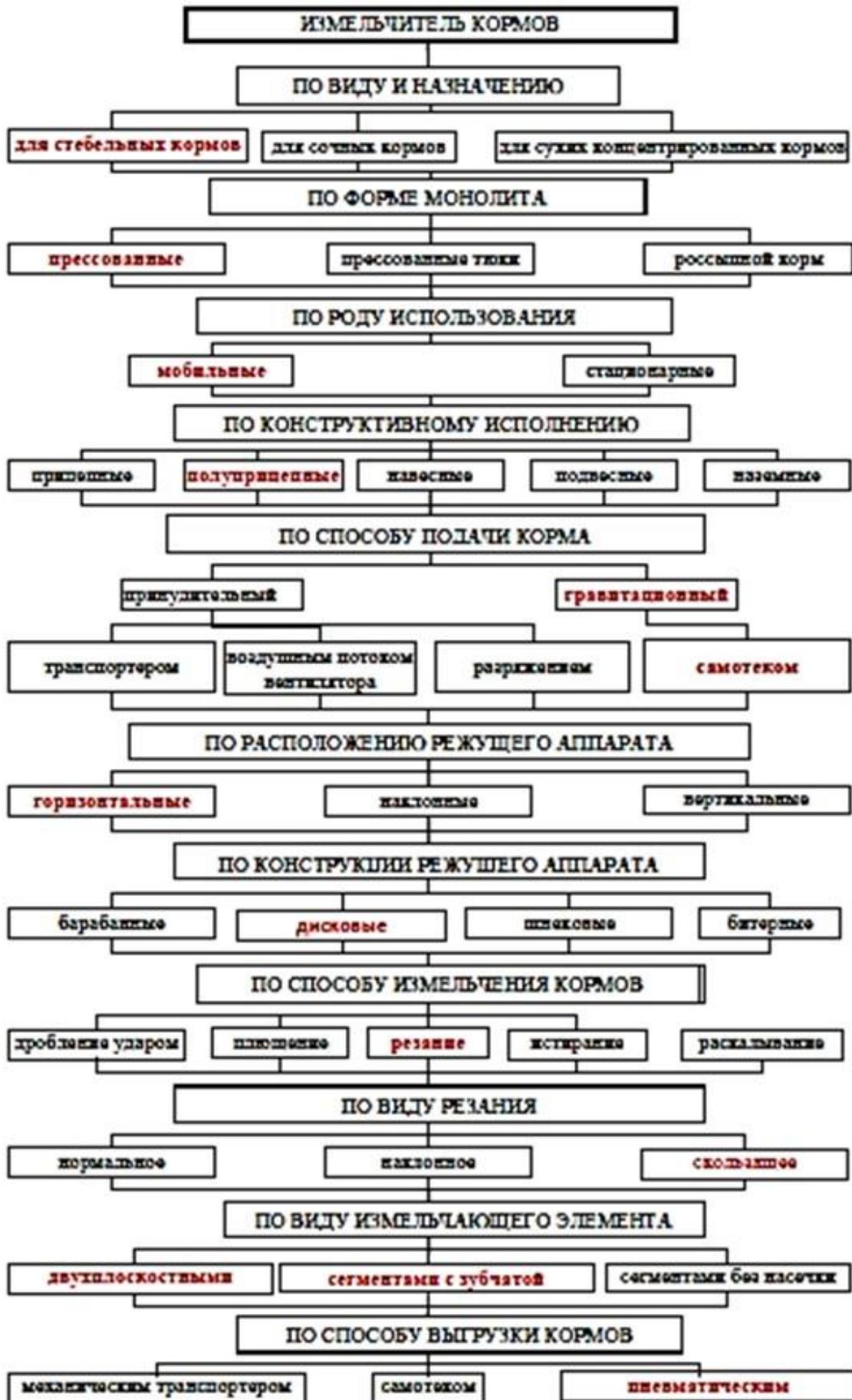


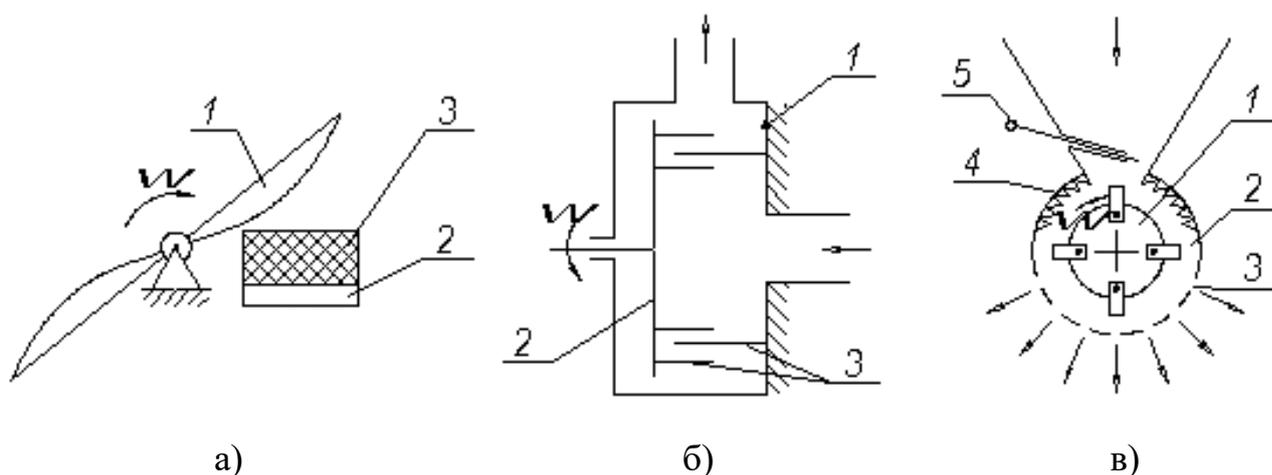
Рисунок 1.7 – Схема квалификации измельчителей грубых кормов

На основании изложенного можно заключить, что снизить энергоемкость измельчения возможно за счет использования машин со следующими характеристиками: привод электрический; принудительная подача материала к двум параллельно расположенным валам с ножами, обеспечивающими скользящее резание [114, 115].

С учетом этого, проведен анализ существующих конструкций машин, используемых для измельчения кормов.

1.3 Анализ конструкций измельчителей грубых стебельных кормов

В современном сельскохозяйственном производстве используются различные конструкции рабочих органов измельчителей стебельных кормов: ножевые, штифтовые и молотковые (рисунок 1.8) [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 17, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 39, 40, 41, 42, 47, 49, 50, 51, 52, 59, 62, 63, 66, 67, 71, 73, 76, 77, 78, 80, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 91, 94, 96, 98, 99, 102, 104, 105, 106, 107, 109, 111, 113, 114, 124, 125, 126, 131, 132, 135, 140, 141, 142].



а – ножевые: 1 – нож; 2 – противорежущая пластина; 3 – измельчаемый материал; б – штифтовые: 1 – неподвижный диск; 2 – подвижный диск; 3 – штифты; в – молотковые: 1 – диск; 2 – молоток; 3 – решето; 4 – дека; 5 – регулирующая заслонка

Рисунок 1.8 – Рабочие органы измельчителей

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается серия машин для измельчения грубых кормов: ИРТ-165, ИГК-30, ИГК-Ф-4, ИРМ-15, ИРТ-Ф-80-1, ИРТ-80, ИРТ-165-01(02).

Основными их недостатками являются большая энергоемкость процесса измельчения (ИРТ-165 – 13,2-26,4 кВт/т·ч; ИГК-30 – 37,5-100 кВт/ т·ч; ИГК-Ф-4 – 23,85-9,22 кВт/ т·ч; ИРМ-15 – 10,7-22 кВт/т·ч; ИРТ-Ф-80-1 – 7,4-13,62 кВт/ т·ч; ИРТ-80 – 7,4-19,6 кВт/ т·ч; ИРТ-165-01(02) – 11,7-42,6 кВт/ т·ч).

Для К(Ф)Х разработаны и серийно выпускаются различные конструкции измельчителей, которые могут эффективно измельчать траву, сено и солому [99, 103, 114, 115, 122, 128, 129, 138].

Измельчитель ИРК-145 (рисунок 1.9) предназначен для измельчения грубых кормов и подстилочного материала в рулонах.

Для измельчения и разбрасывания используется измельчитель соломы навесной ИСН-1,8 (рисунок 1.10).



Рисунок 1.9 – Измельчитель грубых кормов в рулонах ИРК - 145



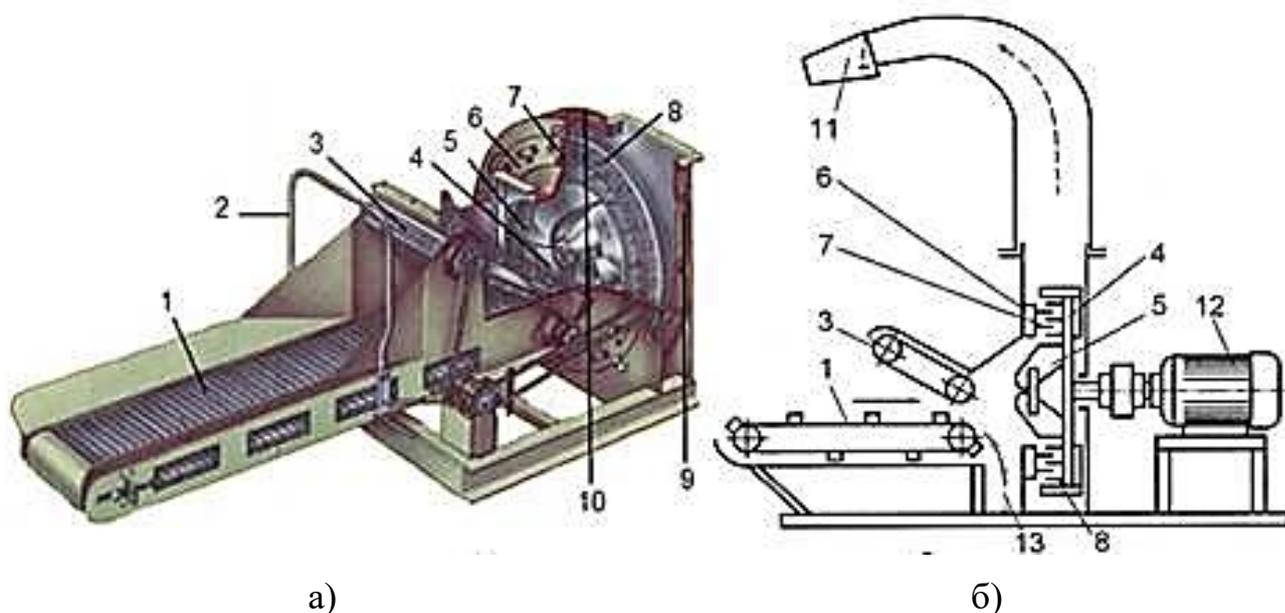
Рисунок 1.10 – Измельчитель соломы навесной ИСН-1,8

Техническая характеристика некоторых прицепных и навесных измельчителей грубых кормов приведена в таблице 1.8.

Измельчитель грубых кормов ИГК-30Б (рисунок 1.11, таблица 1.9) предназначен для измельчения других грубых кормов. Содержит питатель, дробильный аппарат, кожух и раму.

Таблица 1.8 – Техническая характеристика некоторых прицепных и навесных измельчителей грубых кормов

Модель	Производительность, т\ч	Мощность привода, кВт	Удельная энергоёмкость, кВт ч /т
ИРК-145	3,18	50	15,7
ИСН-1,8	1,85	До 50	27,02



1 – горизонтальный конвейер; 2 – рычаг механизма управления конвейерами; 3 – наклонный конвейер; 4 – подвижный диск; 5 – лопасти вентилятора; 6 – неподвижный диск; 7 – неподвижные штифты; 8 – штифты подвижного диска; 9 – люк; 10 – кожух измельчителя; 11 – дефлектор, 12 – электропривод; 13 – ловушка тяжелых включений

Рисунок 1.11 – Общий вид (а) и конструктивно-технологическая схема (б) измельчителя ИГК-30Б

Подвижные и недвижимые ножи аппарата второй ступени снимают, поочередно заостряют и снова устанавливают на место.

Для предотвращения поломки на измельчители установлены защитные устройства. Так, защита горизонтального и наклонного конвейеров осуществляется цепной передачей от распределительной коробки с фрикционной муфтой, которая пробуксовывает в случае перегрузки конвейеров. Шкивы ножевого барабана и винта оснащены различными штифтами.

Таблица 1.9 – Техническая характеристика измельчителя кормов ИГК-30Б

Показатель	Значение
Тип рабочего органа	Дисково-штифтовый
Количество рабочих органов:	
активных	105
пассивных	96
Частота вращения вала дисковой аппарата, об / мин	1124
Производительность при измельчения соломы, т/ч	3
Длина частиц, мм	20-70
Мощность электродвигателя, кВт	30

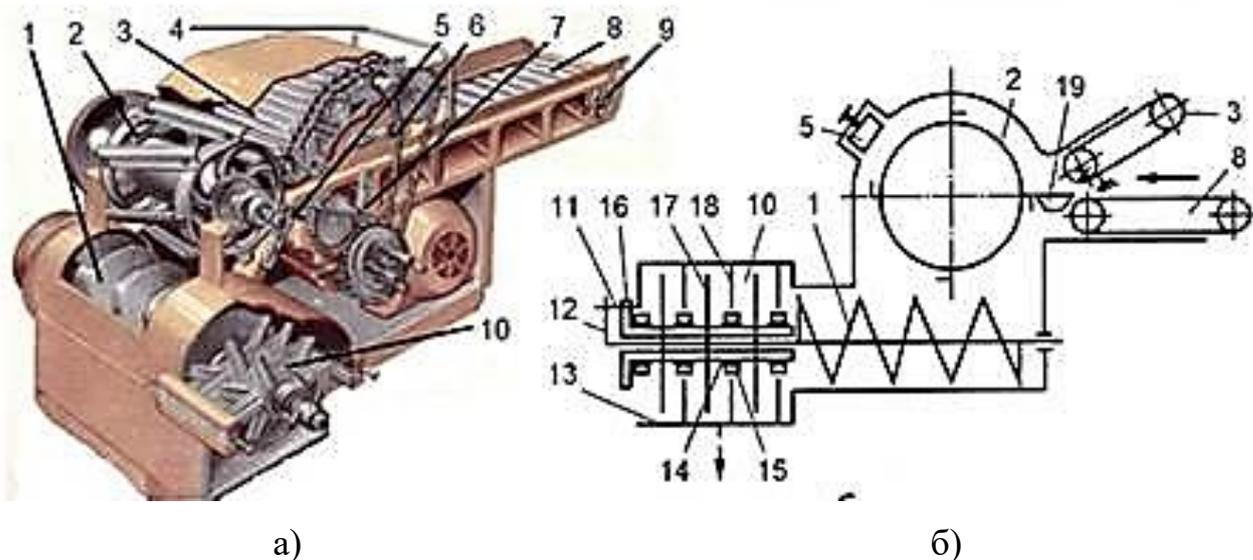
Срезной штифт есть и в приводе аппарата второй ступени, который срезается в случае попадания твердого тела между подвижными и неподвижными ножами. После этого втулка с ножами останавливается, вал винта с фланцем продолжает вращаться и палец последнего выходит из зацепления.

Ножи на барабане первой степени измельчения измельчитель ИКВ-5А «Волгарь-5» (рисунок 1.12) затачивают непосредственно на машине. Для заточки ножей аппарата второй ступени в головке заточного устройства предусмотрен наждачный круг, который приводится от шкива ножевого барабана с помощью фрикционного ролика.

Пружина в стакане распрямляется, последний отходит назад и нажимает кнопку выключателя электродвигателя. После выявления и устранения причины остановки пружину и палец возвращают в рабочее положение и устанавливают новый срезной штифт.

Применение прицепных и навесных измельчителей грубых кормов в семейных крестьянских (фермерских) хозяйствах ограничено в связи с их высокой удельной энергоемкостью процесса измельчения.

Соломорезка производства Турции НХ (рисунок 1.13, а) мощностью до 3 кВт, производительностью 0,2 т/ч позволяет измельчать сухие травы, сено и солому.



1 – шнек; 2 – ножевой барабан; 3 – наклонный конвейер; 4 – механизм управления конвейерами; 5 – зажим цепной передачи редуктора; 6 – зажим цепной передачи наклонного конвейера; 7 – зажим цепной передачи горизонтального конвейера; 8 – горизонтальный конвейер; 9 – зажим горизонтального конвейера; 10 – измельчающий аппарат второй ступени; 11 – срезной штифт; 12 – фланец вала шнека; 13 – опора неподвижных ножей; 14 – прокладка; 15 – кольцо; 16 – втулка; 17 – подвижной нож; 18 – неподвижный нож; 19 – противорежущая пластина

Рисунок 1.12 – Общее строение (а) и конструктивно-функциональная схема (б) измельчителя ИКВ-5А «Волгарь-5»

Производительность кормоизмельчителя КР-0,2 (рисунок 1,13, б) составляет от 120 до 400 кг/час при мощности электродвигателя – 4 кВт.

Стационарные измельчители ИРР (рисунок 1.13, д) предназначены для измельчения грубых кормов в рулонах и тюках.

Соломорезки «Кубанец» (рисунок 1.13, в), «Шмель» (рисунок 1.13, г) и «Хомяк» (рисунок 1.13, е) измельчают сено и солому до травяной муки.

Техническая характеристика измельчителей сена и соломы для крестьянских (фермерских) хозяйств приведена в таблице 1.10.

Анализ технических характеристик измельчителей, предлагаемых для использования в личных подсобных и крестьянских (фермерских) хозяйствах показал, что они имеют высокую удельную энергоёмкость измельчения сена и соломы.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а – НХ (Турция), б – КР-0,2 (Россия), в – «Кубанец» (Россия), г – «Шмель» (Россия), д – ИРР-1 (Россия), е – «Хомяк» (Россия)

Рисунок 1.13 – Измельчители грубых кормов для крестьянских и фермерских хозяйств

Таблица 1.10 –Техническая характеристика измельчителей сена и соломы для К(Ф)Х

Параметры	Марка					
	НХ	КР-0,2	Кубанец	Шмель	ИРР-1	Хомяк
Производительность, т/ч	0,2	до 0,4	0,3	1,0	до 0,8	0,3-0,5
Мощность электродвигателя измельчителя, кВт	3	4	2,2	5,5	25	22
Удельная энергоёмкость, кВт·ч/т	15	10	7,3	5,5	31,3	73,3-44

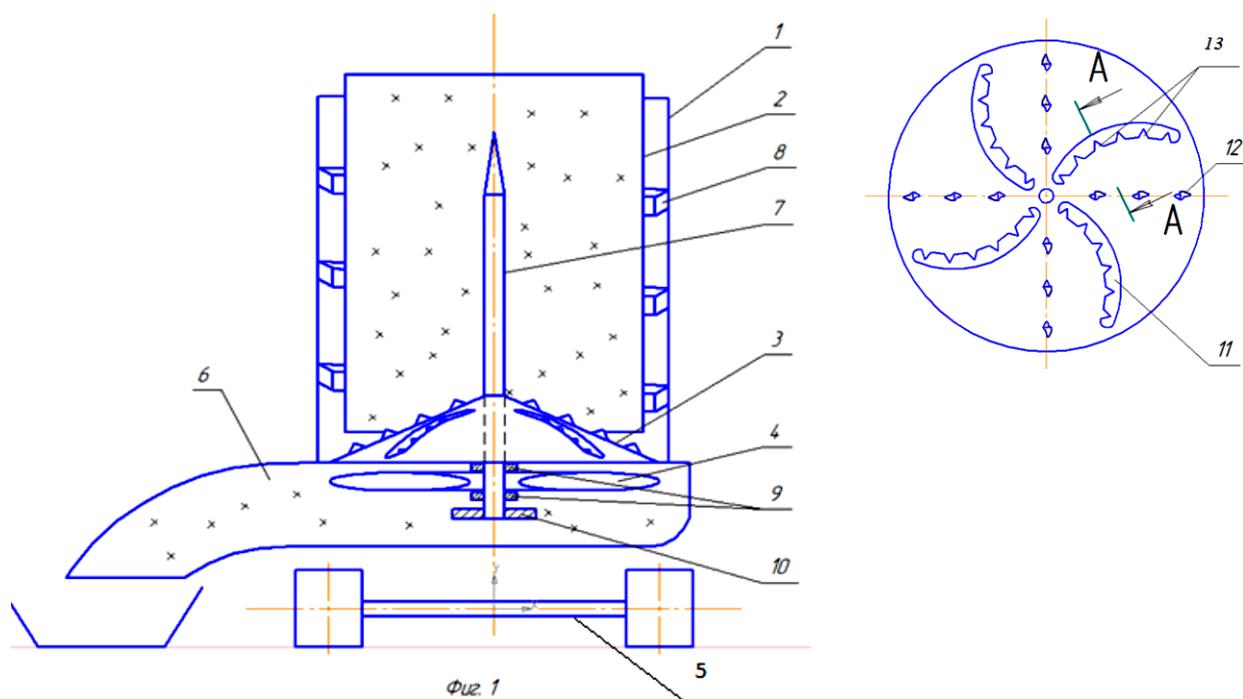
Для измельчения стебельных кормов в малых формах хозяйствования представлена конструктивно-технологическая схема измельчителя (рисунок 1.14, а), измельчающего рабочего органа (рисунок 1.14, б), общий вид бункера (рисунок 1.14, в) и измельчающего рабочего органа (рисунок 1.14, г).

Разработчик ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», авторы В. Ю. Фролов, Д. П. Сысоев, М. И. Туманова и другие (патент РФ № 2457665) [114, 115]. Технические характеристики: производительность – 1,8-2,0 т/ч, потребляемая мощность – 5 кВт, удельная энергоёмкость – 2,5-2,8 кВт·ч/т.

В измельчителе грубых кормов (рисунок 1.15) штифты ротора закрепляются с шагом, меньшим средней длины резки в 1,4-1,8 раза [86].

Недостаток измельчителя – предназначен в основном для измельчения соломы или сена на мобильных агрегатах.

Известен измельчитель грубых кормов (рисунок 1.16) конструкции ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства Российской академии сельскохозяйственных наук», авторы В. К. Скоркин, Ю. А. Иванов [и др.] (патент РФ №2289907) [84]. Под продольными стержнями расположен выгрузной планчатый транспортер с закрепленными ножами. Недостатки данного измельчителя – сложность конструкции, забивание ножей, невозможность измельчения кормов, имеющих тонко-волокнистую структуру.



а)

б)



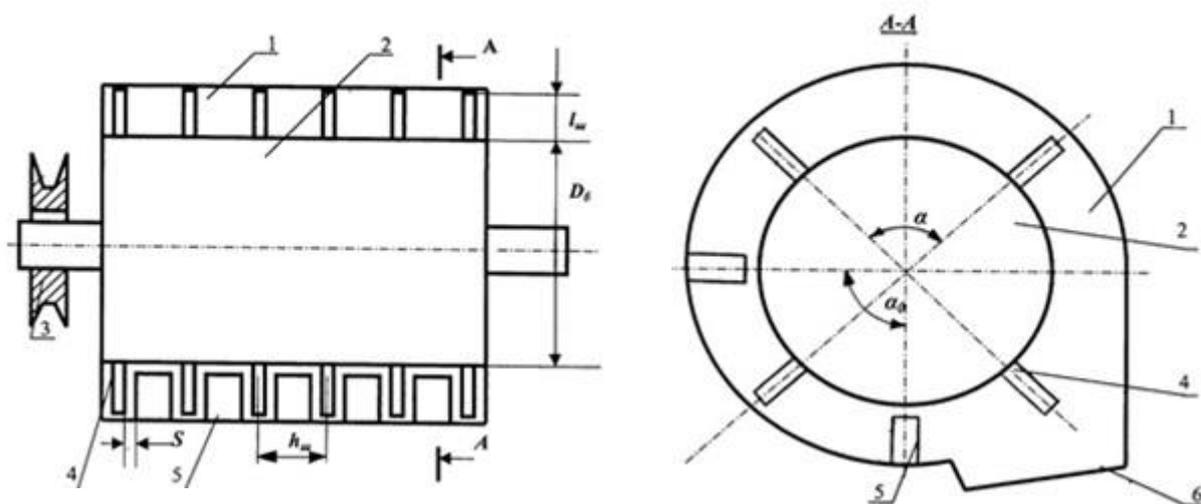
в)



г)

1 – бункер; 2 – рулон; 3 – измельчающий рабочий орган конусного типа; 4 – лопастное колесо; 5 – ходовая часть; 6 – воздухопровод; 7 – игла; 8 – шнековая навивка; 9 – подшипник; 10 – привод шкива, 11 – зубчатый измельчающий элемент; 12 – двухплоскостной сегмент; 13 – ромбообразное отверстие

Рисунок 1.14 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых кормов (а), измельчающего рабочего органа (б), общий вид бункера (в) и измельчающего рабочего органа (г)



1 – камера; 2 – измельчающий ротор; 3 – приводной шкив; 4 – подвижный штифт; 5 – неподвижный штифт; 6 – окно приемной камеры

Рисунок 1.15 – Измельчитель грубых кормов

Известен малогабаритный фермерский измельчитель-смеситель (рисунок 1.17) сельхозпродуктов, который включает раму, бункера, загрузочный лоток, разгрузочный патрубок [85].

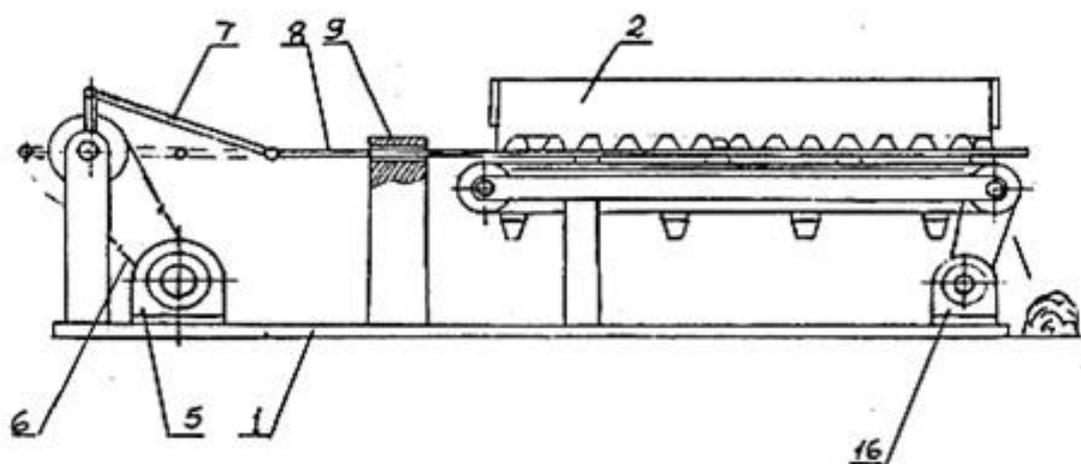
Недостатком данного измельчителя-смесителя является забивание рабочего органа материалами, имеющими тонковолокнистую структуру, большая энергоемкость процесса, низкая надежность и качество работы [3, 16].

Наиболее распространенных измельчителей кукурузных стеблей имеют некоторые особенности.

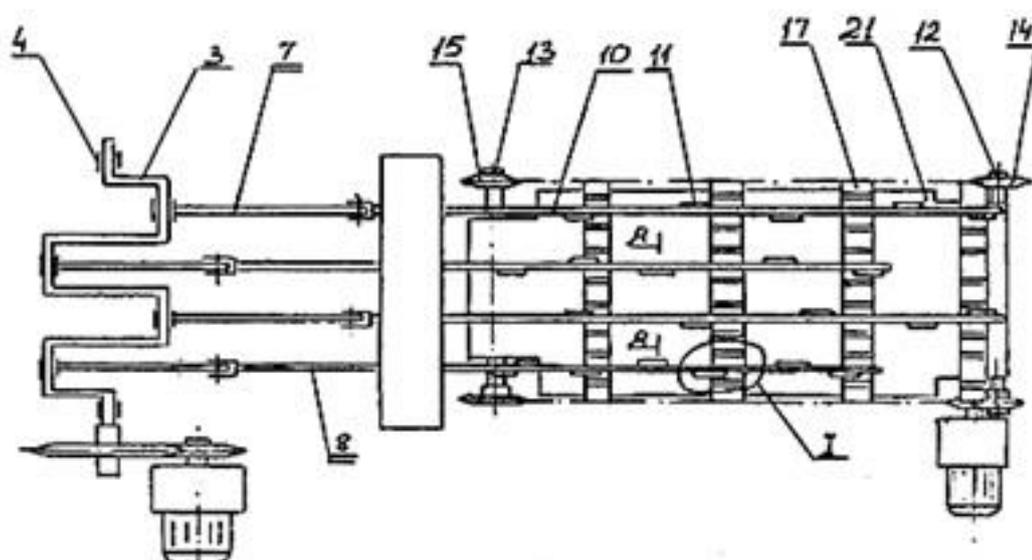
Измельчители китайского производства ПСЕ-2,6; ДТЗ 9QZ-0,6; МЛИН-ОК ПС-2800; ДТЗ 9QZ-1; СД-300 (рисунки 1.18, 1.19) измельчают материал посредством вращающихся плоских ножей (рисунок 1.19) [53]. Техническая характеристика некоторых измельчителей кукурузных стеблей производства КНР приведена в таблице 1.11.

Анализ конструктивных особенностей измельчителей марки ПСЕ-2,6; ДТЗ 9QZ-0,6; МЛИН-ОК ПС-2800 показал их недостатки: сложность конструктивного исполнения; низкая производительность; высокая удельная энергоемкость.

В измельчителе грубых стебельчатых кормов (рисунок 1.20) [17] используется принцип скользящего резания.



а)



б)

а – вид сбоку; б – вид сверху

Рисунок 1.16 – Схема измельчителя грубых кормов с возвратно-поступательным движением ножей

Измельчитель грубых толстостебельных кормов и рабочие органы измельчителя, приведенные на рисунках 1.21 и 1.22, имеют такие основные недостатки, как: сложность конструкции; большая металлоемкость; использование нескольких электродвигателей приводит к увеличению энергоемкости процесса.

Измельчитель грубых кормов, показанный на рисунке 1.23 включает в себя питающий 1 и прижимной 2 транспортеры, вал 3 с закрепленными дисковыми ножами 4 с зубьями 5, шкив 6, рассекаватель 7, вал с дисками 8, индукторы 9 и 10,

роторы 11 и 12, муфты 13 и 14, упругие накопители механической энергии 15 и 16, блок управления и защиты 17, лоток 19 [81, 87]. Заявителями и патентообладателями являются Р. С. Аипов, Я.Д. Осипов и др. (патент РФ №2473391). К недостаткам данной конструкции можно отнести большой расход электроэнергии, низкая надежность и безопасность работы.

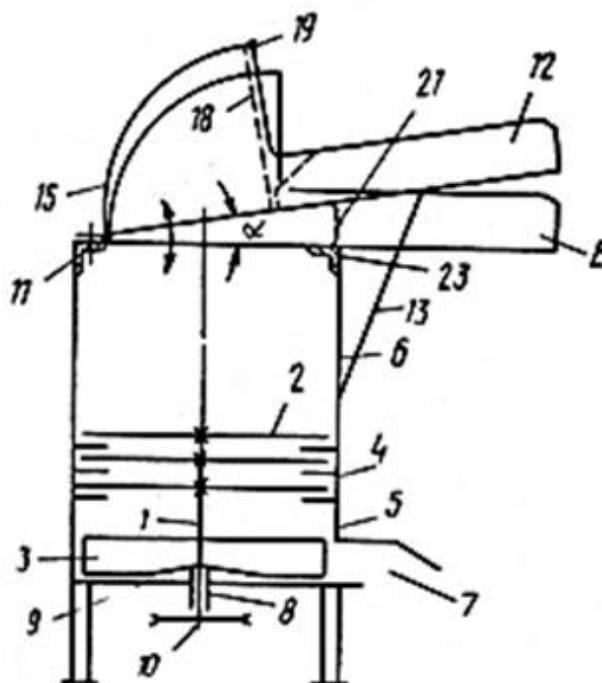


Рисунок 1.17 – Малогабаритный фермерский измельчитель-смеситель

Совершенствование конструкции измельчителей грубых толстостебельных кормов должно идти по пути совмещения процесса плющения и скользящего резания, что даст возможность упростить их конструкцию, повысить производительность и уменьшить энергоемкость процесса измельчения. При этом подача исходного материала должен осуществляться не вручную, а принудительно, за счет прутковых или ленточных транспортеров.

В связи с этим возникает необходимость разработки новой конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых толстостебельных кормов с возможностью их применения в К(Ф)Х и ИП.



ПСЕ-2,6



ДТЗ 9QZ-0,6



МЛИН-ОК ПС-2800



ДТЗ 9QZ-1

Рисунок 1.18 – Измельчители кукурузных стеблей



Рисунок 1.19 – Рабочие органы измельчителей грубых стебельных кормов

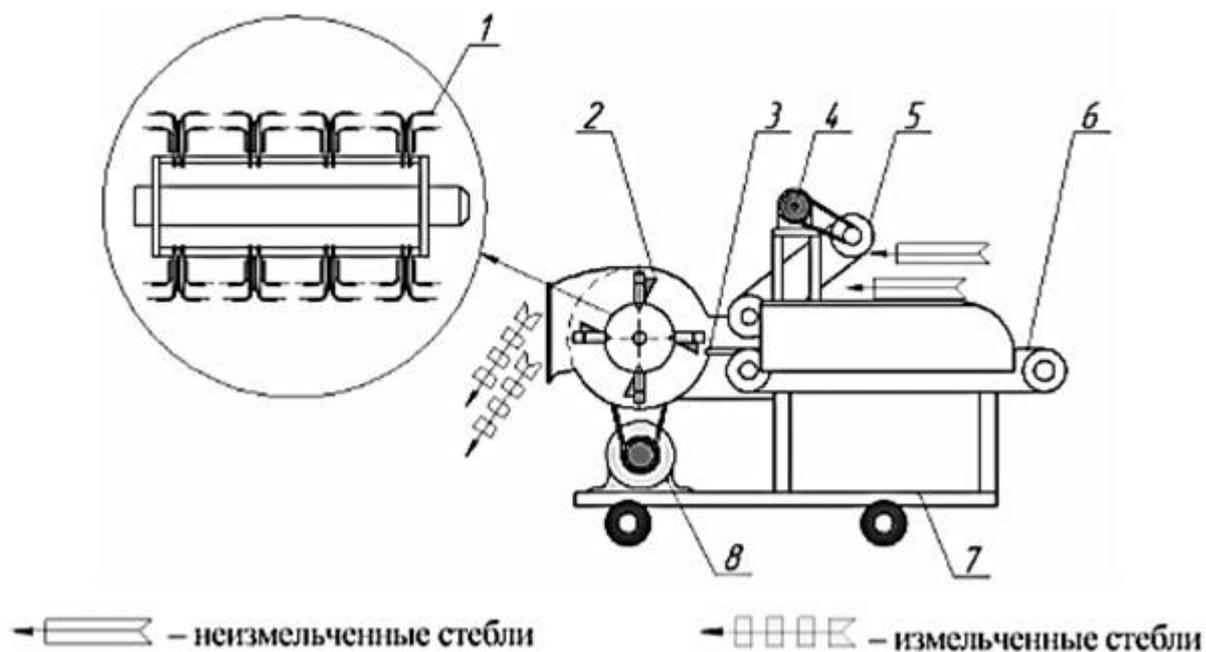
Таблица 1.11 – Техническая характеристика некоторых измельчителей кукурузных стеблей (Китай)

Параметры	Марка			
	ПСЕ-2,6	ДТЗ 9QZ-0,6	МЛИН-ОК ПС-2800	ДТЗ 9QZ-1
Производительность при измельчении, т/ч:				
влажного кукурузного стебля, 64%	1,2	0,8	1,2	1,2
сухого кукурузного стебля, 17%	0,5	0,6	0,5	0,8
Мощность электродвигателя, кВт	2,6	1,5	4,8	3
Удельная энергоёмкость, кВт·ч/т:				
влажного кукурузного стебля, 64%	2,2	1,9	4,0	2,5
сухого кукурузного стебля, 17%	5,2	1,9	9,6	3,8

1.4 Обзор исследований процесса измельчения грубых стебельных кормов

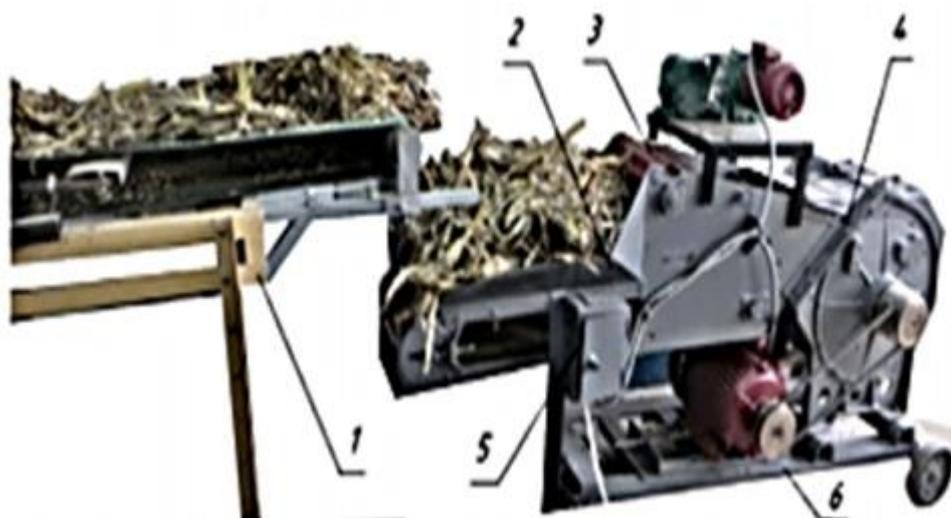
Становление и уровень совершенства средств переработки кормовых материалов на определенных этапах развития общества обуславливаются степенью знаний об усвоении корма животными, потенциальными возможностями и экономической целесообразностью проведения некоторых подготовительных процессов над кормовыми материалами перед выдачей их животным [138, 143, 144].

В упрощенном виде потребление корма животным можно рассматривать как отделение от целого стебля частиц, свободно помещающихся в полости рта животного, и расщепление частиц с целью создания доступности желудочным сокам к кормовым элементам, которые находятся в этих частицах.



- 1 – поперечные серповидные лезвия; 2 – вертикальные клиновидные лезвия; 3 – противорез; 4 – привод питателя; 5 – прижимной транспортер; 6 – продольный транспортер; 7 – рама с колоссами; 8 – привод барабана

Рисунок 1.20 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых стебельчатых кормов



- 1 – подающий транспортер; 2 – питающий транспортер; 3 – наклонный транспортер; 4 – камера измельчения; 5 – пульт управления; 6 – общая рама с системой привода узлов

Рисунок 1.21 – Общий вид измельчителя грубых толстостебельных кормов



а)



б)

а – барабан; б – комбинированный нож
1 – поперечное серповидной лезвие; 2 – вертикальное клиновидное лезвие

Рисунок 1.22 – Рабочий орган измельчителя

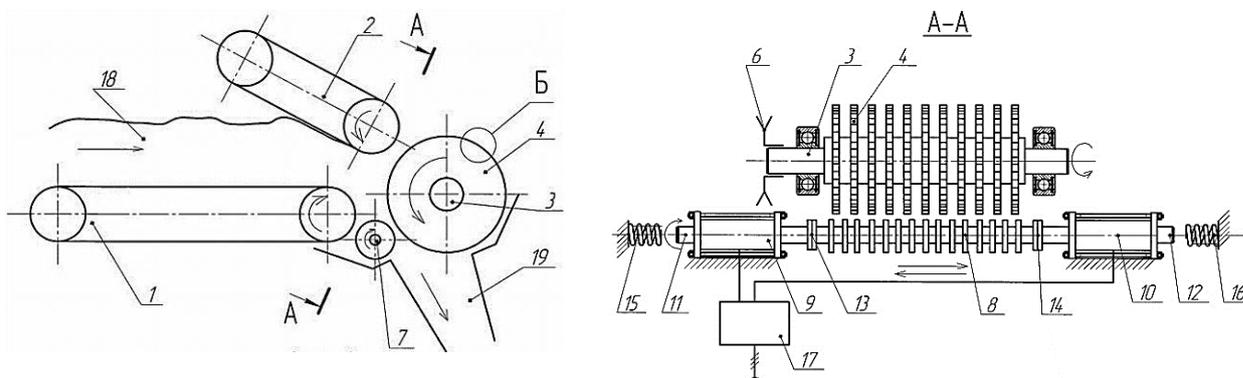


Рисунок 1.23 – Измельчитель грубых кормов

Процессы измельчения кормов животным и переноса этих действий для выполнения с помощью технических средств нельзя было в полной мере понять без выяснения механической стороны и поиска других по природе действий, но дающих аналогичные или более целесообразные результаты.

Анализируя доступную на каждом этапе развития человеческого общества полноту осведомленности по спектру процессов по переработке корма в организме животного и отбирая из них те процессы, которые могут быть адаптированы в орудиях подготовки кормов к скармливанию, человек постепенно применял

способы механического воздействия на корм: раздавливание, перетирание, резки, смешивания и их комбинированные сочетания как между собой, так и совместно с увлажнением, нагревом, действием химических реагентов и выполняя подготовительные процессы в закрытых емкостях при повышенном давлении.

Большой вклад в разработку и совершенствование теории измельчения грубых кормов и технических средств внесли В. П. Горячкин, В. А. Желиговский, О. Г. Ангилеев, Г. И. Бремер, В. Ю. Фролов, А. В. Бурмага, А. Н. Глобин, А. Р. Демидов, В. Л. Кирпичев, А. М. Кукта, М. Ф. Кулик, Л. Б. Левинсон, Г. Г. Маслов, С. В. Мельников, Н. Е. Резник, Н. С. Сергеев, В. И. Сыроватка, Е. И. Трубилин и др.

Научные поиски оптимального, с точки зрения затрат энергии, размещения ножа и выполнения профиля его лезвия, адаптированного к условиям применения в средствах механизированного процесса измельчения кормов, позволили В.П. Горячкину рекомендовать условия получения скользящего резания без смещения ножа в поперечном направлении, что упрощало конструкцию режущих аппаратов и позволяло выполнять резание в скоростном режиме. Определенные параметры процесса скользящего резания уменьшали в 2-4 раза усилие, которое было необходимо при перерезании стеблевых кормов нормальным способом резания.

Разработкой измельчителей грубых кормов для крестьянских (фермерских) хозяйств в разное время занимались В. Р. Алешкин, А. Ф. Башков, Д. И. Грицай, А. В. Рамзаев, Н. Ю. Сарбатова, Д. П. Сысоев, М. И. Туманова и др.

Анализ эволюции кормоперерабатывающих машин позволяет сделать вывод, что для решения второго вопроса – измельчение стеблевых кормов путем их расщепления вдоль волокон, к концу XIX в. специальные технические устройства не были созданы. Причиной этому, прежде всего, было отсутствие надежных в работе измельчающих инструментов, удовлетворяющих необходимым действиям по расщеплению кормов, и недостаточное количество экономических энергоприводов в сельскохозяйственном производстве.

Способ резания в варианте деления стеблей на частицы в режущей паре сплошным ножом в полной мере не адаптировался к условиям расщепления. Поэтому возник вопрос о выборе других конструктивных решений рабочих

органов и технологических приемов передачи усилий к стеблевой массе. Одним из первых подходов было применение дискообразных пил и шарнирно закрепленных шредерных бил с короткими поперечно закрепленными резцами. Эти рабочие органы сдирали стружку с монолитных крупных стеблей, например, кукурузы, но плохо работали при измельчении соломы злаковых культур.

Кроме того, долговечность рабочих органов была невысокой. Поэтому для выполнения процесса расщепления стеблей необходимо искать другие формы взаимодействия рабочих органов с материалом. В большинстве научно обоснованных вариантов предполагалось объединить оба измельчающих процесса: перерезание стеблей поперек волокон ножом и измельчение с расщеплением обособленных частиц штифтовым аппаратом.

Величину расхода энергии на измельчение можно установить на основании известных теорий измельчения [114, 130, 137, 139].

Определить работу измельчения можно с использованием двух энергетических теорий измельчения: поверхностной и объемной.

Поверхностная теория измельчения предложена П. Риттингером. Согласно этой теории, работу измельчения можно рассчитать по зависимости:

$$A = \alpha \Delta S, \quad (1.1)$$

где α – коэффициент пропорциональности; ΔS – приращение удельной поверхности.

Также известна объемная теория измельчения [50], согласно которой эту же работу можно определить по выражению:

$$A = k \Delta V, \quad (1.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности; ΔV – приращение объема тела.

Л.Б. Левинсоном предложено зависимость Кирпичева-Кика выражать так [58]:

$$A = \frac{\sigma_{сж}^2 V}{2E}, \quad (1.3)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности материала на сжатие; E – модуль упругости материала; V – первоначальный объем материала.

Уменьшить энергетические затраты на деформацию и образование продуктов измельчения можно путем:

- уменьшения упругих деформаций;
- уменьшения числа циклов деформации частиц разрушаемого продукта;
- измельчения материала до крупности, требуемой технологией производства.

Приведенные выше зависимости можно использовать лишь при сравнительных расчетах. При их использовании получается только относительное значение работы, которая затрачивается на измельчение. Определение же абсолютного значения работы измельчения возможно, если увязать ее со степенью измельчения.

С. В. Мельниковым предложена приближенная рабочая формула для проведения количественных расчетов, в которой удельная работа на измельчение увязана со степенью измельчения и удельными энергозатратами [67, 68]:

$$A_{изм} = C_{np} \left[C_V \lg \lambda^3 + C_S (\lambda - 1) \right], \quad (1.4)$$

где $A_{изм}$ – удельная работа измельчения, которая учитывает влияние способа измельчения и конструкции измельчителя, Дж/кг; C_{np} – коэффициент, который

отражает зависимость неучтенных факторов от принципа действия рабочих органов и конструктивных особенностей измельчителя; C_V и C_S – коэффициенты, которые учитывают удельные энергозатраты на упругие деформации и на образование новых поверхностей при измельчении (определяются опытным путем); λ – степень измельчения материала.

А. Р. Демидов и С. Е. Чирков для качественной и количественной характеристики процесса измельчения рекомендуют пользоваться [41]:

- гранулометрическим составом продуктов измельчения;
- степенью измельчения материала;
- удельной энергоемкостью процесса измельчения.

Процесс измельчения протекает с образованием множества мелких частиц с сильно развитой поверхностью. Таким образом, образование новых поверхностей – основное содержание процесса измельчения.

Степень измельчения рассчитывается по зависимости:

$$\lambda = \frac{D}{d}, \quad (1.5)$$

где D – средний размер кусков исходного материала, м; d – средний размер частиц конечного продукта, м.

Уменьшение размеров частиц приводит к росту удельной поверхности. Исходя из этого, значение степени измельчения можно рассчитать так:

$$\lambda = \frac{S_{\kappa}}{S_{\eta}}. \quad (1.6)$$

где S_k – площадь поверхности частиц конечного продукта, м²; S_n – площадь поверхности кусков исходного материала, м².

Наряду с относительными величинами, теория измельчения оперирует также и абсолютными значениями вновь образованной поверхности путем установления приращения удельной поверхности:

$$S = S_k - S_n . \quad (1.7)$$

Величина энергоемкости процесса измельчения определяется способом действия рабочих органов измельчающих устройств на обрабатываемый материал.

Согласно [67, 68], удельный расход энергии W (кВт·ч/т) равен:

$$W = \frac{N}{q_p} . \quad (1.8)$$

Величина, обратная удельной энергоемкости, характеризует общую эффективность \mathcal{E} (т/кВт·ч):

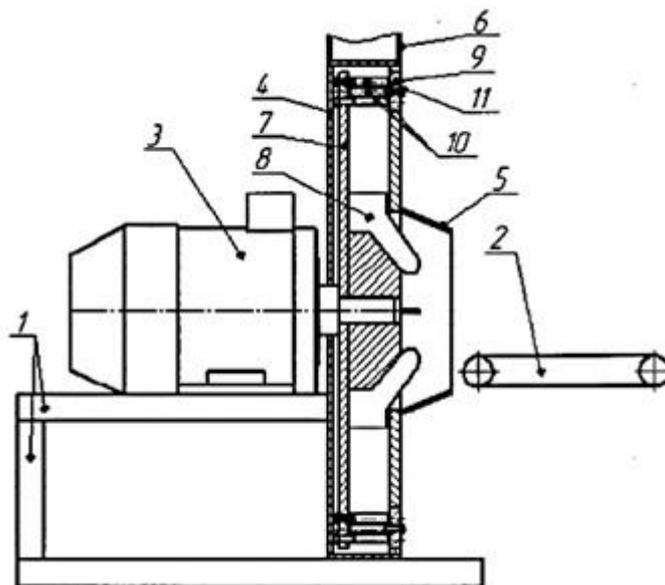
$$\mathcal{E} = \frac{q_p}{N} . \quad (1.9)$$

Большой интерес представляют конструктивные разработки ученых, позволяющие снизить энергозатраты при измельчении грубых стебельных кормов.

В ФГОУ ВО «Челябинская государственная агроинженерная академия» (профессор Сергеев Н.С. и Судаков К.В.) предложена конструкция измельчителя стебельных культур, приведенная на рисунке 1.24 [85].

Такое конструктивное выполнение пальцев образуют острые грани измельчающих штифтов, которые выполняют функции режущей и

противорежущей пластин, что позволяет обеспечить измельчение резанием, снизить энергозатраты и расширить технологические возможности измельчителя.



1 – рама; 2 – подающее устройство; 3 – электродвигатель; 4 – корпус; 5 – загрузочное окно; 6 – разгрузочное окно; 7 – подвижный диск; 8 – подающие лопатки; 9 – неподвижный диск; 10 – штифты; 11 – резьбовое соединение

Рисунок 1.24 – Измельчитель стебельных культур

Применение в конструкции измельчителя двух ступеней измельчения позволяет минимизировать энергозатраты [91].

Исследования, проведенные в ФГБОУ ВО «Дальневосточный ГАУ» по измельчению кукурузы, показали, что наиболее перспективным методом измельчения является метод плющения или раздавливания [14]. Вальцы могут быть расположены под углом 45° , 20° и горизонтально (рисунок 1.25).

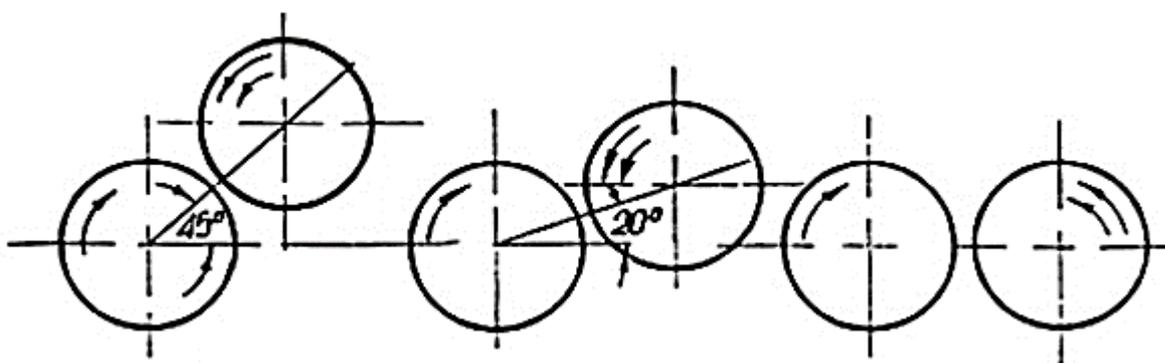


Рисунок 1.25 – Принципиальная схема вальцовой плющилки

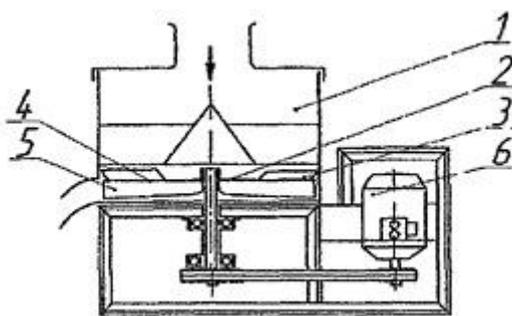
Профессор А. В. Бурмага отмечает следующие факторы, влияющие на рабочий процесс вальцовых плющилок: угол захвата, диаметр и окружные скорости вальцов, величина рабочего зазора между вальцами, свойства измельчаемого материала и др. [14].

Профессор В. Ю. Фролов и доцент Д. П. Сысоев (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ) отмечают, что измельчение грубых стебельных кормов должно происходить резанием материала со скольжением для уменьшения усилия резания и мощности, затрачиваемая на рабочий процесс измельчения. Ими установлено, что частота вращения измельчающего барабана с радиусом кривизны режущей кромки ножа 0,3-0,35 м должно находиться в диапазоне 830-1130 об/мин, угол скользящего резания 25-40° [129].

В. Р. Алешкин отмечает, что эффективным способом снижения энергозатрат и улучшения качества продукции является многоступенчатая схема измельчения кормов [2].

А. Ф Башковым разработана методика инженерного расчета двухроторного измельчителя грубых кормов [7].

О. Г. Ангилеев О.Г. и Д. И. Грицай предложили использовать измельчитель, показанный на рисунке 1.26 [41].



1 – бункер загрузочный, 2 – диск ножевой, 3 – нож наклонный, 4 – паз сквозной (окно),
5 – лопасть-швырялка; 6 – электродвигатель

Рисунок 1.26 – Схема измельчителя початков дискового ножевого одноступенчатого

Установлено влияние скорости резания и высоты возвышения ножей над поверхностью диска на производительность измельчителя и время измельчения единичной порции материала [39].

Большой интерес представляет исследования, проведенные А.В. Рамзаевым по установлению энергоёмкости процесса измельчения кормов с использованием шнекового измельчителя [91].

В результате проведенных исследований А.В. Рамзаев установил, что при использовании шнекового измельчителя энергоёмкость процесса измельчения составляют: соломы озимой пшеницы – 0,26-0,30 кВт·ч/т; соломы ячменной – 0,23-0,26 кВт·ч/т; сено из разнотравья – 0,32-0,35 кВт·ч/т. Эти результаты на 40-60 % ниже энергоёмкости существующих измельчителей, использующих принцип резания [91].

Исследования, проведенные Н. Ю. Сарбатовой и профессором В. Ю. Фроловым с целью оценки однородности гранулометрического состава при скоростях вращения измельчающего барабана: $v_1=27,1$ м/с; $v_2=21$ м/с; $v_3=16,6$ м/с; $v_4=13,6$ м/с и зазоре между сегментами барабана и противорежущей декой $S=10$ мм, $S=35$ мм и $S=50$ мм показали, что этот показатель снижается при одних и тех же скоростях вращения барабана ($v=21$ м/с) [107]. Так, при $S=10$ мм однородность гранулометрического состава достигает 94%, а при $S=35$ мм, $S=50$ мм снижается, соответственно, до 48% и 57%.

М. И. Тумановой в результате исследования работы измельчителя с дисковым рабочим органом установлен зависимость [115]:

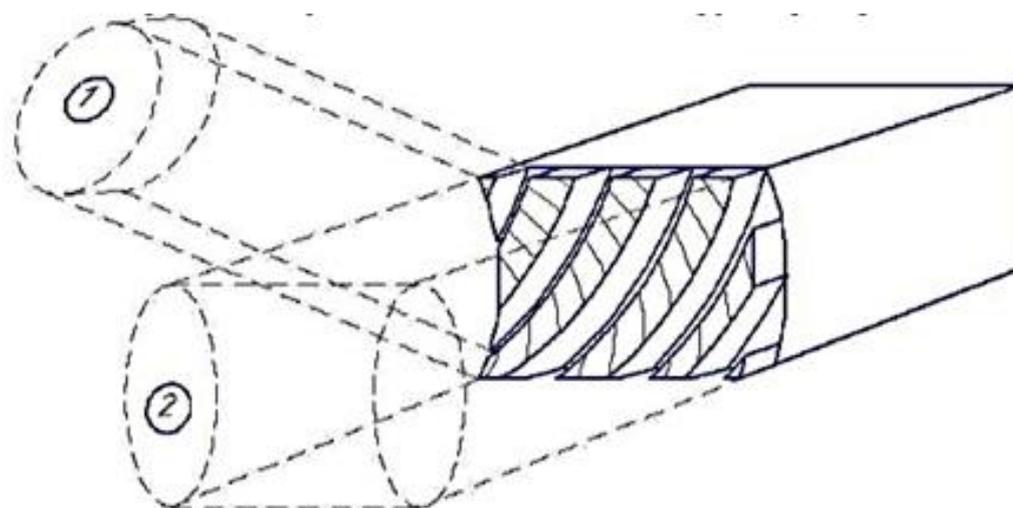
$$\begin{aligned}
 N = & 2,57128 + 0,582433\omega + 0,061233Z + 0,798067n + 0,753\alpha - \\
 & - 0,0002\omega Z + 0,0001\omega\alpha - 0,0001Z\alpha - 0,0001n\alpha - 0,0055\omega^2 - \\
 & - 0,0006Z^2 - 0,0077667n^2 - 0,0073\alpha^2,
 \end{aligned}
 \tag{1.10}$$

где ω – угловая скорость вращения измельчающего рабочего органа; Z – количество зубчатых сегментов; α – угол между измельчающим рабочим органом конусного типа и горизонтальными зубчатыми измельчающими элементами.

Туманова М. И. определила, что максимальные затраты удельной энергоёмкости $W_{y0} = 0,0079$ кВт ч/кг (7,9 кВт ч/т) происходят при $\omega = 3,14$ с⁻¹, а при $Z = 6$ удельная энергоёмкость имеет минимальное значение $W_{y0} = 0,002$ кВт ч/кг (2 кВт ч/т) [110].

Установлены рациональные значения параметров измельчителя: $\omega = 3,2-4,6$ с⁻¹; $Z = 6-9$; $n = 7-9$; $\alpha = 30^0-35^0$ [115].

В. Н. Демченко и А. А. Вертий для снижения энергоёмкости процесса предлагают измельчать грубые стебельные корма в двух плоскостях: «в первой (боковой) плоскости необходимо обеспечить продольное расщепление волокон, а во второй (фронтальной) плоскости – резание всего слоя стеблей» (рисунок 1.27) [17].



1 – боковая плоскость; 2 – фронтальная плоскость

Рисунок 1.27 – След рабочего органа в измельчаемом слое в виде цилиндрических поверхностей, расположенных в нескольких плоскостях

Проведенный анализ показал:

- для измельчения сухих стеблей кукурузы В. Н. Демченко и А. А. Вертий предлагают использовать комбинированные ножи [44];

- Н. С. Сергеев и К. В. Судаков предлагают использовать два диска, установленные вертикально: «подвижный с подающими лопатками и неподвижный со штифтами» [90];

- в измельчителях китайского производства используются молотковые барабаны и вращающие плоские ножи, обеспечивающие двухступенчатое измельчение: плющение (раздавливание) и скользящее резание [53];

- для измельчения стеблей озимых и яровых культур А. В. Рамзаев [91] предлагает использовать шнековый рабочий орган;

- В. Ю. Фролов, Д. П. Сысоев и М. И. Туманова [114, 115] – вращающий диск с зубчатыми сегментами; А.Ф Башков [7] – двух роторный измельчитель, которые обеспечивают скользящее резание.

Анализ показал, что для измельчения толстостебельных грубых кормов следует использовать два способа измельчения: плющение (раздавливание) и скользящее резание.

Таким образом, разработка новой конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых толстостебельных кормов для семейных ферм на базе К(Ф)Х является актуальной.

1.5 Выводы. Цель и задачи исследования

Для устойчивого развития К(Ф)Х и животноводства КБР приняты ведомственные целевые программы «Поддержка начинающих фермеров Кабардино-Балкарской Республики» и «Развитие семейных животноводческих ферм на базе крестьянских (фермерских) хозяйств в Кабардино-Балкарской Республике».

В результате реализации данной программы созданы более 3 тыс. крестьянских (фермерских) хозяйств, в том числе свыше 800 семейных

животноводческих ферм, что позволило увеличить урожайность сельхозкультур и поголовье сельскохозяйственных животных.

В процессе переработки сельхозпродукции имеют место сопутствующие отходы в виде стеблей, стержней кукурузы, корзинок подсолнечника и пр., имеющие важное народнохозяйственное значение как корм для крупного рогатого скота в измельченном виде.

При этом К(Ф)Х и ИП сталкиваются с проблемой выбора машины, позволяющей измельчать грубые толстостебельные корма при минимальных энергозатратах. Основным недостатком известных измельчителей является достаточно высокие энергетические затраты на измельчение.

В связи с этим разработка новой конструктивно-технологической схемы измельчителя, позволяющая эффективно измельчать толстостебельные грубые толстостебельные корма при минимальных энергозатратах является актуальной для семейных ферм и малых К(Ф)Х.

Цель исследования – обоснование параметров и режимов работы измельчителя грубых толстостебельных кормов для снижения энергоемкости процесса измельчения.

Задачи исследования.

1. Провести конструктивно-технологический анализ измельчителей грубых толстостебельных кормов с обоснованием перспективного направления их совершенствования.

2. Разработать конструктивно-технологическую схему измельчителя, позволяющую измельчать грубые толстостебельные корма при минимальных энергетических затратах.

3. Провести теоретические исследования рабочего процесса измельчителя грубых толстостебельных кормов и определить факторы, влияющие на производительность и энергоемкость измельчения.

4. Разработать опытный образец измельчителя грубых толстостебельных кормов.

5. Оптимизировать конструктивно-режимные параметры измельчителя по критерию энергоемкости.

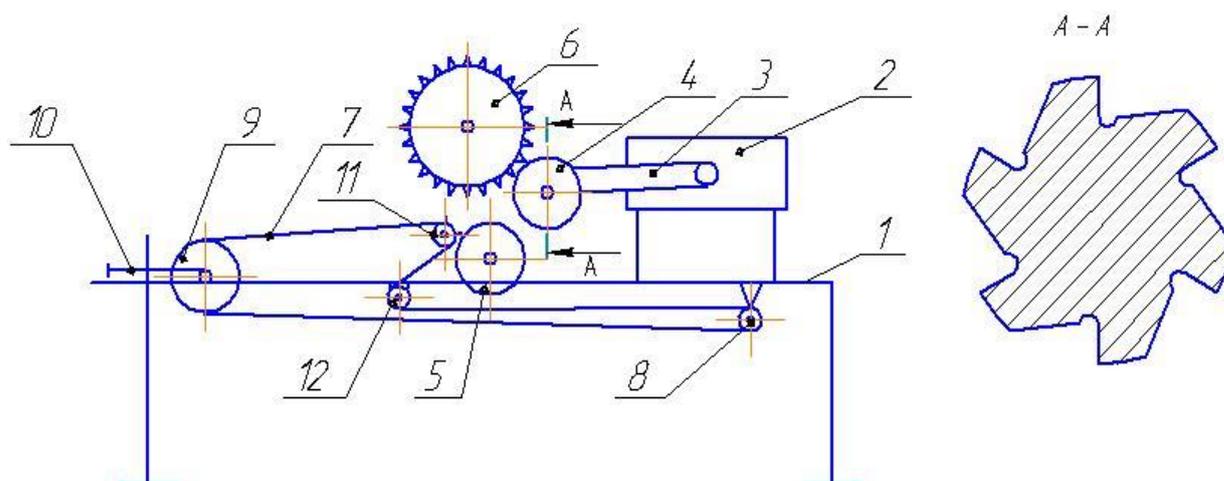
6. Оценить экономическую эффективность использования предлагаемого измельчителя грубых толстостебельных кормов.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ

2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых толстостебельных кормов

С целью повышения эффективности использования измельчителей грубых кормов необходимо, чтобы они обеспечивали эффективное измельчение толстостебельных грубых кормов и обладали высокой пропускной способностью при малых энергетических затратах.

Для решения указанной проблемы предлагается конструктивно-технологическая схема измельчителя толстостебельных грубых кормов (рисунок 2.1) [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 89, 116, 119, 120, 121, 122].



1 – рама; 2 – двигатель; 3 – механизм привода; 4 – подающий барабан; 5 – измельчительный барабан; 6 – вал с циркуляционными дисками; 7 – транспортер; 8, 9 – ведущий и ведомый валы транспортера; 10, 11, 12 – механизмы натяжения транспортера

Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых толстостебельных кормов

Работает измельчитель следующим образом. При включении электродвигателя 2 механизм привода 3 передает крутящий момент к рабочим органам. Исходный материал укладывается на ленточный транспортер 7 и направляется к подающему валу с противорежущими ножами 5. Циркуляционные

диски 6, вращаясь против часовой стрелки, подают исходный материал в камеру измельчения (в межзубовое пространство подающего и основного валов), а также обеспечивают придерживание исходного материала для исключения их обратного движения. Затягивание исходного материала в межзубовое пространство обеспечивается подающим валом 5, а основной вал с режущими ножами 4 производит измельчение исходного материала и отбрасывает его на ленточный транспортер 7. Последний транспортирует конечный продукт к месту складирования.

2.2 Общая модель взаимодействия рабочего органа измельчителя с измельчаемым материалом

Тип измельчителя выбирается в зависимости от размеров исходного материала, его физико-механических свойств, а также от требований к дисперсности конечного продукта и требуемой производительности. В общем виде все существующие измельчители включают привод, систему управления и рабочий орган. Следовательно, провести усовершенствование процесса измельчения возможно за счет усовершенствования либо системы управления (возможность управления техпроцессом), либо за счет усовершенствования рабочего органа. Именно рабочий орган является главным элементом конструкции, от которого зависит вид измельчающегося материала, его дисперсность, качество и производительность процесса переработки.

Для уменьшения затрат необходимо оптимизировать систему управления (технология) и рабочий орган, также следует обратить внимание на материал и его взаимодействие с рабочим органом, так как от взаимодействия рабочего органа и материала зависит количество энергии, затрачиваемое измельчителем на процесс измельчения. То есть необходимо учитывать технологические параметры и разработать рабочий орган, которому необходим минимум энергии для выполнения технологического процесса измельчения материала.

Анализ показал, что наиболее распространенным в настоящее время для измельчения растениеводческой продукции является процесс резания.

Анализируя конструкторско-технологические параметры измельчителей, необходимо математически описать модели работы предлагаемой конструкции и рассмотреть два основных этапа: взаимодействие рабочего органа с материалом; определение основных конструктивно-технологических параметров измельчителя.

На первом этапе взаимодействия рабочего органа с измельчаемым материалом определяются основные характеристики этого процесса, чтобы в дальнейшем использовать данную модель и на ее основе описать работу измельчителя в общем.

На втором этапе производится определение основных конструктивно-технологических параметров измельчителя, учитывающих свойства измельчаемого материала. К этим параметрам относится определение производительности измельчителя, степени измельчения и удельной энергоемкости процесса.

Рассматривается взаимодействие рабочего органа с измельчаемым материалом и для получения математической модели учитываются основные факторы, оказывающие существенное влияние на данный технологический процесс. К числу этих факторов относятся геометрические параметры измельчителя, технологические факторы и свойства измельчаемого материала.

Для исследования вопроса об изменении напряжений при переходе от одной точки к другой, бесконечно близкой ей точке, рассматриваются условия равновесия бесконечно малого прямоугольного параллелепипеда.

В тех случаях, когда части упругого тела находятся в движении, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + R_x &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + R_y &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + R_z &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}; \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где σ – компоненты напряжения по площадкам, определяемые соответствующими индексами (x, y, z) ; R – проекции на координатные оси объемных сил; ρ – плотность; u – перемещение; t – время.

Уравнение (2.1) является основным дифференциальным уравнением теории упругости.

Для учета свойств измельчаемого материала необходимо учитывать связь между напряжениями и деформациями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \varepsilon_t; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \varepsilon_t; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \varepsilon_t; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{G} \sigma_{xy}; \varepsilon_{yz} = \frac{1}{G} \sigma_{yz}; \varepsilon_{zx} = \frac{1}{G} \sigma_{zx}; \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где E – модуль упругости; G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона; $\varepsilon_t = \alpha T$ – температурная деформация.

Из уравнения (2.2) получаем систему уравнений, в которых выражается напряжение через деформацию для произвольной ортогональной системы координат:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2G\varepsilon_{xx} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - \frac{E}{1-2\mu}\alpha T; \\ \sigma_{yy} &= 2G\varepsilon_{yy} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - \frac{E}{1-2\mu}\alpha T; \\ \sigma_{zz} &= 2G\varepsilon_{zz} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - \frac{E}{1-2\mu}\alpha T; \\ \sigma_{xy} &= G\varepsilon_{xy}; \sigma_{yz} = G\varepsilon_{yz}; \sigma_{zx} = G\varepsilon_{zx}; \lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}; \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Уравнения (2.3) выражают общую форму закона упругости (закона Гука). Они содержат два независимых параметра упругости, в качестве которых обычно принимают модуль упругости E и коэффициент μ Пуассона.

Компоненты деформации однозначно описывают деформацию элемента тела. В деформированном состоянии все элементы должны образовывать единое тело. Если условия сопоставимости деформаций нарушаются, то из отдельных частей нереально сделать тело без разрывов и пустот.

В том случае, когда уравнения совместимости удовлетворяются в каждой точке тела, перемещения u_x, u_y, u_z , будут непрерывными функциями координат, что гарантирует непрерывное превращение начальной формы тела в конечную (деформированную).

Решение задачи о напряженном и деформированном состоянии сводится к поиску перемещений u_x, u_y, u_z , и последние выбираются среди класса непрерывных функций с непрерывными частичными производными к третьему порядку, уравнения совместимости деформаций удовлетворяются тождественно.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}; \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}; \varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}; \varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}; \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Совокупность дифференциальных уравнений равновесия (2.1), геометрических уравнений (2.4) и физических соотношений (2.3) образуют систему из 15 уравнений, в которые входят 6 компонент напряжений, 6 компонент деформации и 3 компонента перемещения. Таким образом получается замкнутая система уравнений, позволяющая описывать поведение материала в динамике.

Для решения задачи о напряженном и деформированном состоянии в систему уравнений дифференциального равновесия тела (2.1) подставляем напряжение по уравнению (2.3). В результате получают видоизмененное уравнение Ляме:

$$\left. \begin{aligned} G\nabla^2 u_x + (G + \lambda) \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{E}{1-2\mu} \alpha T + R_x &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \\ G\nabla^2 u_y + (G + \lambda) \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{E}{1-2\mu} \alpha T + R_y &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}; \\ G\nabla^2 u_z + (G + \lambda) \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{E}{1-2\mu} \alpha T + R_z &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}; \\ \theta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}; \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Полученная модель позволяет определить параметры и факторы взаимодействия рабочего органа с измельчаемым материалом. В дальнейшем представленная модель использована для проектирования измельчителя грубых толстостебельных кормов.

Момент возникновения разрушающее контактное напряжение зависит от прикладываемого к ножу критического усилия резания P [5, 9, 34, 35, 47, 48, 88, 107].

Работу измельчения $A_{ИЗ}$ есть сумма работ, затраченных на сжатие $A_{СЖ}$ и резание $A_{РМ}$:

$$A_{ИЗ} = A_{СЖ} + A_{РМ}. \quad (2.6)$$

Предварительное сжатие слоя обрабатываемого материала $\varnothing d_{СТ}$ происходит на глубину $h_{СЖ}$. При этом на нож действует сила сопротивления $P_{ПК}$. Работу, затраченную на предварительное сжатие, можно рассчитать по зависимости:

$$A_{СЖ} = 2P_{ПК}h_{СЖ}. \quad (2.7)$$

Зависимости сопротивления резанию материала под кромкой лезвия ножа $P_{ПК}$, сопротивления слою сжатия фаской лезвия $P_{СФ}$ и обжатия фаски лезвия материалом $P_{ОМ}$ от параметров процесса резания имеют вид [93, 94, 95, 97]:

$$P_{ПК} = b_p \Delta \ell \sigma_{РН}; \quad P_{СФ} = \frac{E}{2} \cdot \frac{h_{СЖ}^2}{d_{СТ}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad P_{ОМ} = \frac{E}{2} \cdot \frac{h_{СЖ}^2}{d_{СТ}} \mu, \quad (2.8)$$

где b – толщина лезвия ножа, м; $\sigma_{РН}$ – разрушающее контактное напряжение, МПа; E – модуль Юнга, МПа; μ – коэффициент Пуассона.

В процессе резания на фаску ножа действует сила:

$$N = P_{C\Phi} \sin \varepsilon + P_{OM} \cos \varepsilon. \quad (2.9)$$

Она определяет возникновение на фаске лезвия силы трения F_{HC} :

$$F_{HC} = N f_{HM} = N \operatorname{tg} \varepsilon, \quad (2.10)$$

где f_{HM} – динамический коэффициент взаимного трения обрабатываемого материала и материала лезвия; ε – угол трения, град.

Также нормальную силу можно рассчитать по зависимости:

$$N = \cos \varepsilon \sqrt{P_{OM}^2 + P_{C\Phi}^2}. \quad (2.11)$$

На другой грани лезвия от действия P_{OM} возникает сила трения F_{TC} :

$$F_{TC} = P_{OM} f_{HM}. \quad (2.12)$$

Сила F_{HC} действует под углом ε к нижней боковой грани ножа. Ее проекция на нижнюю спинку ножа F'_{HC} равна:

$$F'_{HC} = F_{HC} \cos \varepsilon. \quad (2.13)$$

Или:

$$F'_{HC} = f_{HM} (P_{C\Phi} 0,5 \sin 2\varepsilon + P_{OM} \cos^2 \varepsilon). \quad (2.14)$$

Приложенная к ножу критическая сила в начале процесса резания должна преодолеть сумму проекций сил, действующих в вертикальном положении:

$$P_{PM} = 2(P_{ПК} + P_{CФ} + F_{ТС} + F'_{НС}). \quad (2.15)$$

Или:

$$P_{PM} = 2b\ell\sigma_{PH} + \frac{Eh_{CЖ}^2}{d_{СТ}} \left[\operatorname{tg} \varepsilon + f_{ПМ} \left\{ \mu + \left(\operatorname{tg} \varepsilon 0,5 \sin 2\varepsilon + \mu \cos^2 \varepsilon \right) \right\} \right]. \quad (2.16)$$

Работа, затрачиваемая на резание, равна:

$$A_{PM} = (d_{СТ} - h_{Л} - h_{СЖ}) P_{PM}. \quad (2.17)$$

Учитывая выражение (2.6), имеем:

$$A_{PM} = (d_{СТ} - h_{Л} - h_{ВН}) 2b\Delta\ell\sigma_{PH} + \frac{Eh_{CЖ}^2}{d_{СТ}} \left[\operatorname{tg} \varepsilon + f_{ПМ} \left\{ \mu + \left(\operatorname{tg} \varepsilon 0,5 \sin 2\varepsilon + \mu \cos^2 \varepsilon \right) \right\} \right]. \quad (2.18)$$

Работа измельчения в окончательном виде, таким образом, равна:

$$A_{ИЗ} = E \frac{h_{CЖ}^2}{d_{СТ}} \operatorname{tg} \varepsilon h_{CЖ} + (d_{СТ} - h_{Л} - h_{ВН}) 2b\Delta\ell\sigma_{PH} + \frac{Eh_{CЖ}^2}{d_{СТ}} \left[\operatorname{tg} \varepsilon + f_{ПМ} \left\{ \mu + \left(\operatorname{tg} \varepsilon 0,5 \sin 2\varepsilon + \mu \cos^2 \varepsilon \right) \right\} \right]. \quad (2.19)$$

Выражение (2.19) характеризует зависимость между конструктивными (ε, b) , физико-механическими $(E, f_{ПМ}, \sigma_{PH})$ и режимными $(h_{ВН}, d_{СТ}, h_{Л})$ параметрами. Из этого выражения следует, что с уменьшением фактического угла

заточки лезвия ε , нагруженной длины лезвия Δl , ее фактической толщины b , предельного разрушающего контактного напряжения резания σ_{PH} работа измельчения снижается ввиду наличия скользящего резания.

При рассмотрении траектории движения точки C лезвия ножа AB (рисунок 2.4) в случае нормального и скользящего резания необходимо обеспечить соблюдение условия: $\tau > 0^\circ$.

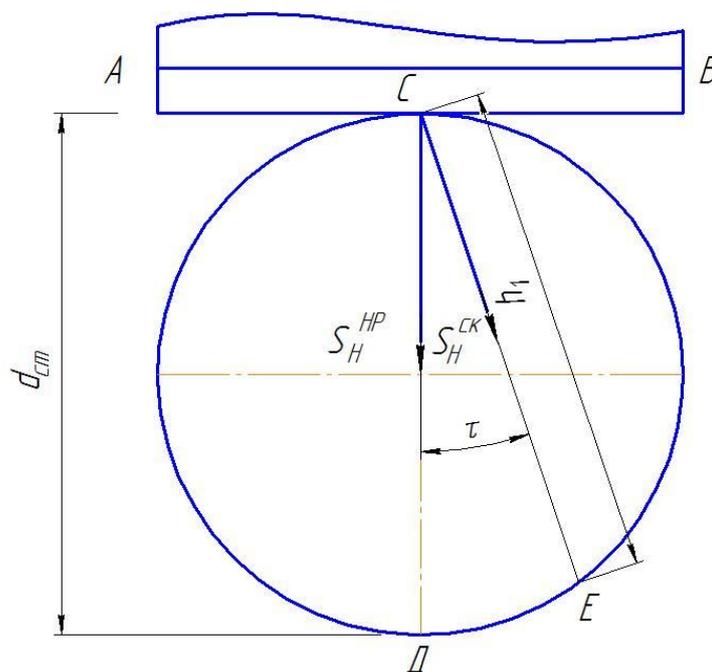


Рисунок 2.4 – Схема к определению толщины перерезаемого стебля

При нормальном резании направление перемещения ножа S_H^{HP} – по нормали к лезвию CD . При скользящем резании направление перемещения ножа S_H^{CK} отклонено от нормали на угол скольжения τ и совпадает с направлением CE . Из $\triangle CDE$ видно, что CD соответствует толщине d_{CT} материала, а CE – толщине h_1 материала, которая трансформируется. Данное явление называется кинематической трансформацией толщины материала h_1 .

Из $\triangle CDE$ следует:

$$h_1 = \frac{d_{CT}}{\cos \tau}. \quad (2.20)$$

Степень влияния кинематической трансформации толщины перерезаемого стебля на условия резания характеризует коэффициент ее кинематической трансформации:

$$k_h = \frac{h_1 - d_{CT}}{d_{CT}} = \frac{1}{\cos \tau} - 1. \quad (2.21)$$

Указанный коэффициент не зависит от начальной толщины перерезаемого стебля d_{CT} и постоянен для конкретного значения τ .

Далее покажем, как изменяется величина длины активной части лезвия при изменении формы линии лезвия ножа (рисунок 2.5).

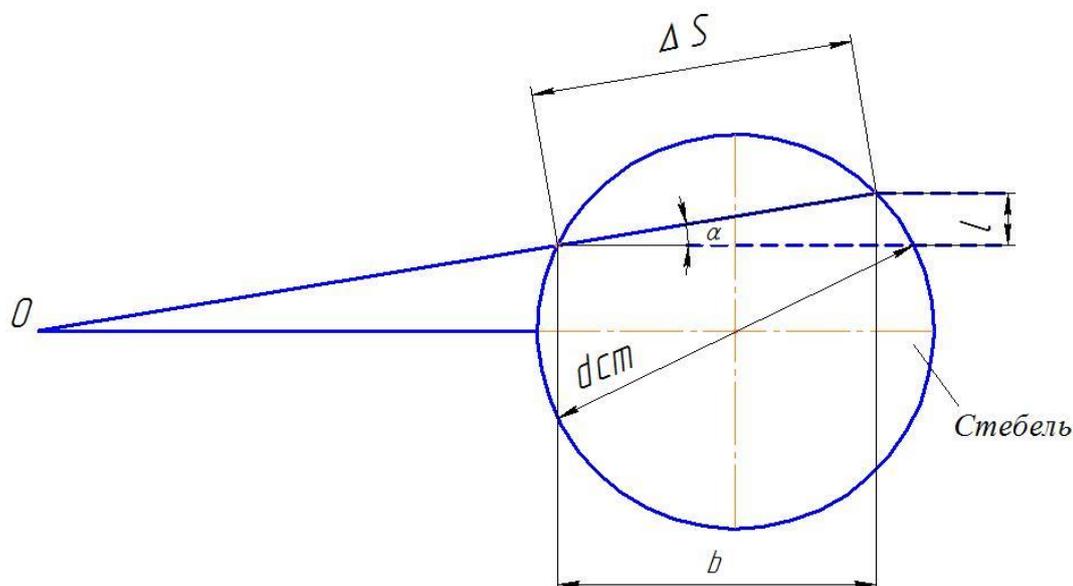


Рисунок 2.5 – Схема вхождения ножа с прямым лезвием в стебель

Длина активной части прямого лезвия выражается через значение b при предположении, что дуга l – прямой отрезок. Ввиду того, что d_{CT} в рассматриваемых условиях мало:

$$\Delta S = \frac{b}{\cos \alpha}, \quad (2.22)$$

где α – угол между активной частью лезвия ножа и линией, соединяющей ось вращения рабочего органа с центром поперечного сечения стебля, град.

Значение b равно:

$$b = \frac{60S}{z_{HO}n_{PO}}, \quad (2.23)$$

или

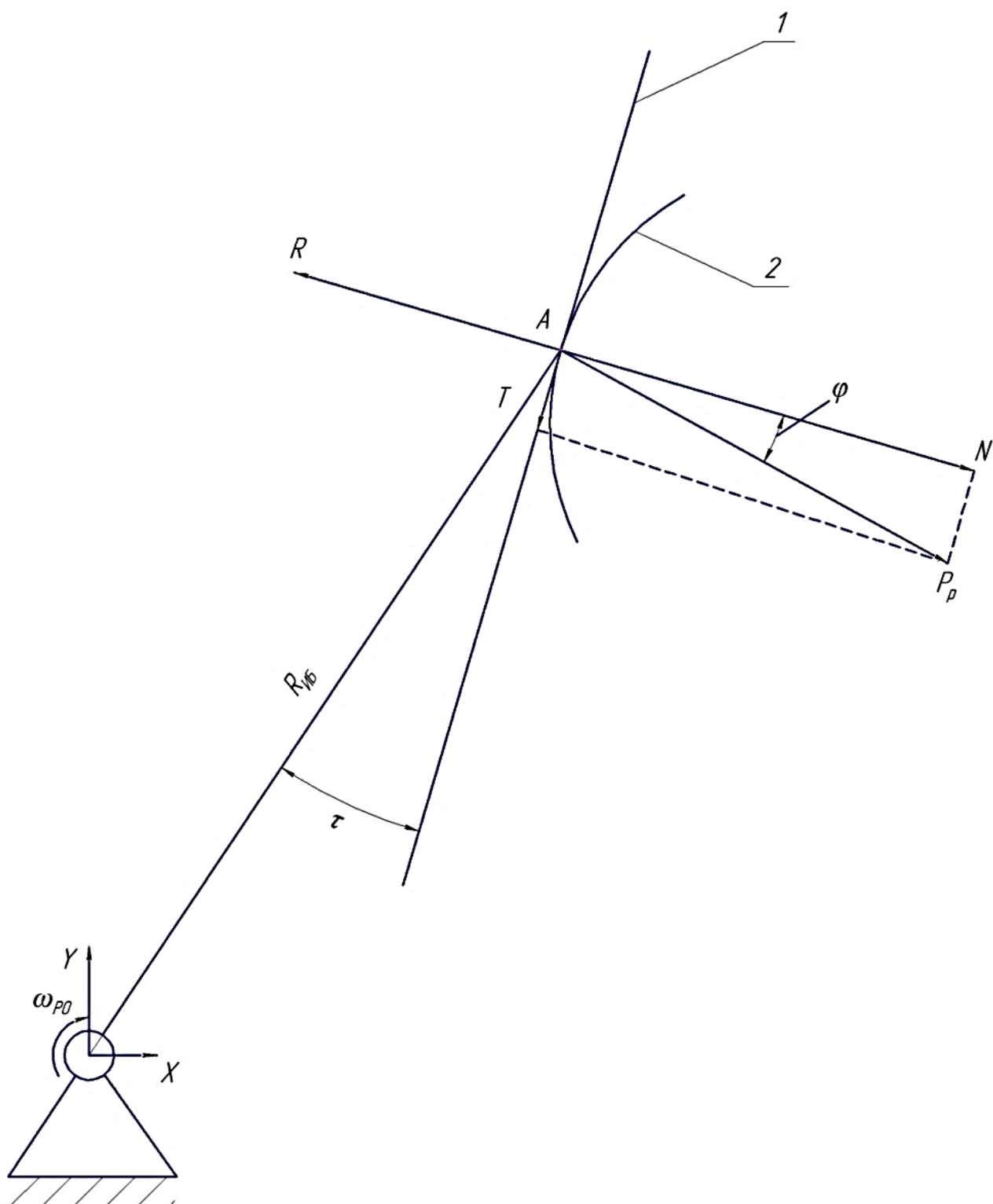
$$\Delta S = \frac{60S}{z_{HO}n_{PO} \cos \alpha}, \quad (2.24)$$

где S – подача, м/с; z_{HO} – число ножей на рабочем органе, шт.; n_{PO} – число оборотов рабочего органа, мин⁻¹.

Общая мощность, потребляемая измельчителем на процесс работы, представляет собой сумму мощностей, расходуемых на холостой ход N_{XX} и на резание $N_{ИЗ}$:

$$N_{ОБ} = N_{ИЗ} + N_{XX}. \quad (2.25)$$

Уравнение моментов относительно оси вращения вала измельчительного барабана имеет вид (рисунок. 2.6):



1 – стебель; 2 – лезвие ножа

Рисунок 2.6 – Схема сил, действующих на стебель в процессе резания

$$M_P = NR_{ИБ} \cos \tau + TR_{ИБ} \sin \tau, \quad (2.26)$$

где τ – угол скольжения, град.; $R_{ИБ}$ – радиус-вектор, м.

Так как

$$\frac{T}{N} = \operatorname{tg} \varphi = f', \quad (2.27)$$

имеем:

$$T = Nf'. \quad (2.28)$$

Следовательно:

$$M_P = NR_{ИБ} (\cos \tau + f' \sin \tau). \quad (2.29)$$

С учетом того, что удельное давление равно

$$q_{\text{уд}} = \frac{N}{\Delta S}, \quad (2.30)$$

имеем:

$$N = \Delta S q_{\text{уд}}. \quad (2.31)$$

Тогда окончательно получим:

$$M_P = \Delta S q_{\text{уд}} R_{ИБ} (\cos \tau + f' \sin \tau). \quad (2.32)$$

Выражение $q_{уд}(\cos \tau + f' \sin \tau)$ представляет собой удельную работу резания (Дж/м²).

Таким образом, мощность, затрачиваемая на измельчение исходного материала составит:

$$N_{из} = M_P \omega_{PO} = \Delta S q_{уд} R_{ИБ} \omega_{PO} (\cos \tau + f' \sin \tau). \quad (2.33)$$

Значение $N_{ХХ}$ будет равно:

$$N_{ХХ} = \frac{m_{PO} g R_{ТВ} \pi n_{PO}}{30 g_{ОВ}^2 \eta_{ПР}}, \quad (2.34)$$

где m_{PO} – масса рабочего органа, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; $R_{ТВ}$ – радиус тела вала рабочего органа, м; $g_{ОВ} = 0,995$ – потери на трение в опорах вала [133]; $\eta_{ПР} = 0,9$ – КПД привода [133].

Производительность измельчителя рассчитывается по зависимости (кг/ч):

$$Q_{из} = 3600 K_{ИМ} h_{ИМ} \ell_{ИБ} v_{ИМ} \rho_{ИМ}, \quad (2.35)$$

где $K_{ИМ}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность давления измельчаемого материала по всей поверхности измельчительного барабана (0,3-0,5); $h_{ИМ}$ – высота слоя измельчаемого материала, м; $\ell_{ИБ}$ – длина измельчительного барабана, м.

Графическая реализация (2.35) представлена на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Теоретическая зависимость производительности измельчителя от скорости подачи измельчаемого материала

Степень измельчения можно рассчитать по выражению

$$\lambda_{ИЗ} = 1,27 \frac{\sum_{i=1}^m S_{ИЗi} (b_H - 2\Delta b_H) \psi_{СТ}}{\sum_{j=1}^{z_{СТ}} \ell_j d_{СТ}^2}, \quad (2.36)$$

где $S_{ИЗi}$ – площадь поперечного сечения измельчаемого материала в плоскости рабочей зоны ножа, м; Δb_H – зазор между режущими и противорежущими ножами, м; $\psi_{СТ}$ – коэффициент, учитывающий степень плотности размещения стеблей в поперечном сечении $S_{ИЗi}$; ℓ_j – длина частиц измельченных стеблей, м; $d_{СТ}$ – усредненный диаметр стебля, м.

Энергоемкость измельчения рассчитывается по зависимости:

$$\mathcal{E}_{ИЗ} = \lambda_{ИМ} \frac{N_{ОБ}}{Q_{ИЗ}}. \quad (2.37)$$

Графическая реализация (2.37) представлена на рисунке 2.8.

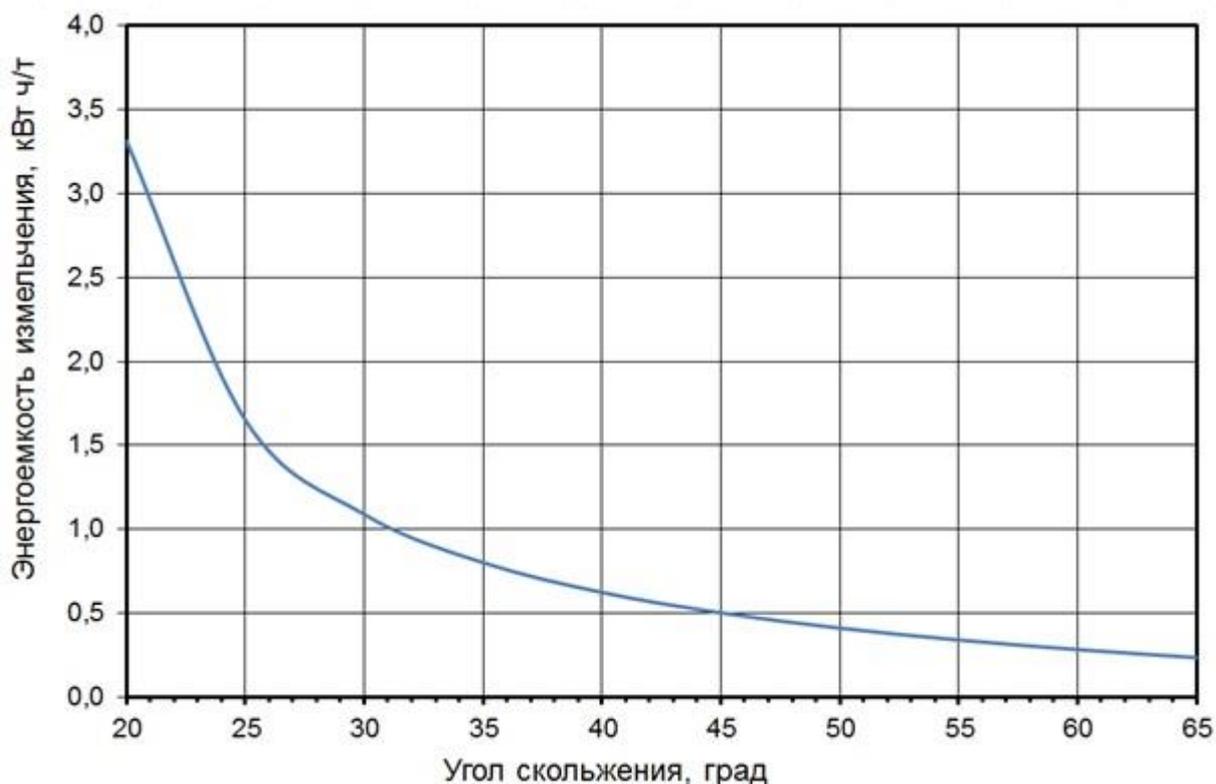


Рисунок 2.8 – Зависимость энергоёмкости измельчения от угла скольжения

Анализ полученной зависимости показывает, что наиболее оптимальным диапазоном изменения угла скольжения является 30-40°. При этих значениях энергоёмкость измельчения составляет 0,6-1,1 кВт·ч/т.

2.4 Определение дальности полета частицы измельченного материала

Схема для определения дальности полета частицы измельченного материала приведена на рисунке 2.9.

Значение силы сопротивления воздуха R_B определяется зависимостью [90]:

$$R_B = kF_M V_{ИМ}^2 \frac{\gamma_B}{g}, \quad (2.38)$$

где k – коэффициент сопротивления; γ_B – удельный вес воздуха, кг/м³; F_M – Миделево сечение, м²; $V_{ИМ}$ – скорость частицы измельченного материала, м/с.

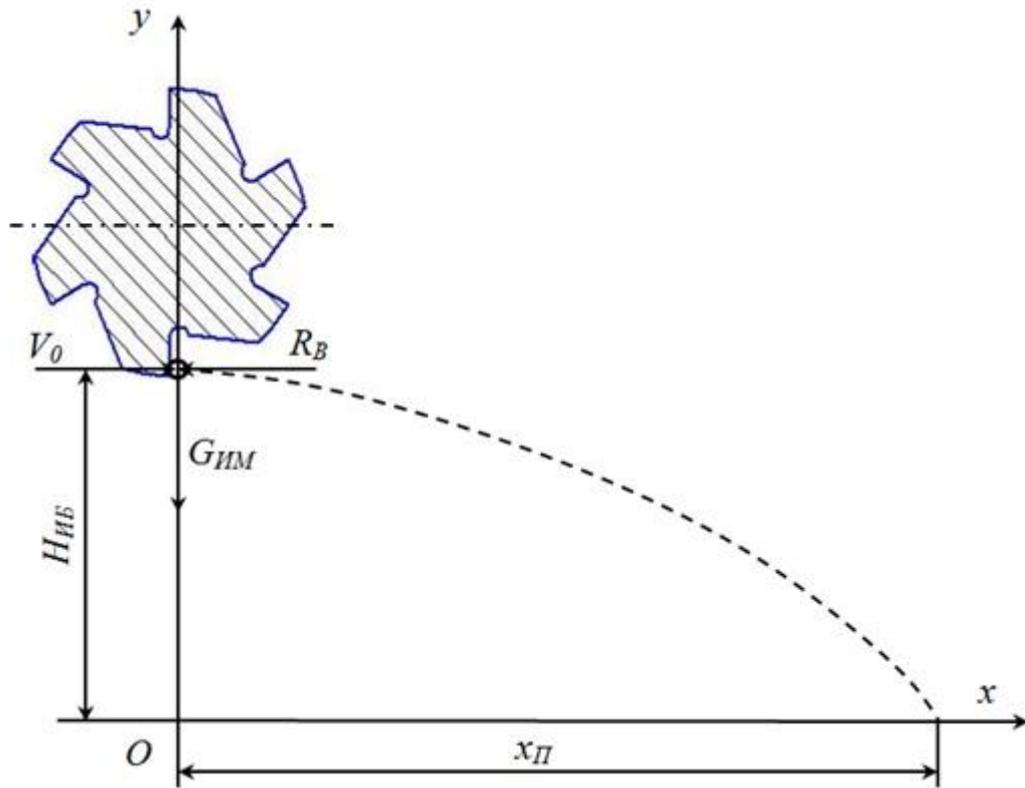


Рисунок 2.9 – Схема для определения дальности полета частицы измельченного материала

Дифференциальное уравнение полета частицы измельченного материала в направлении оси x , имеет вид:

$$\begin{cases} m_{ИМ} \ddot{x} = -R_B (\dot{x})^2 \\ m_{ИМ} \ddot{y} = -m_{ИМ} g - R_B (\dot{y})^2 \end{cases} \quad (2.39)$$

Отсюда:

$$\ddot{x} = \frac{kF_M \gamma_B}{m_{IM} g} (\dot{x})^2. \quad (2.40)$$

Обозначив

$$k_n = \frac{kF_M \gamma_B}{m_{IM} g}, \quad (2.41)$$

получим:

$$\ddot{x} = -k_n (\dot{x})^2, \quad (2.42)$$

где k_n – коэффициент парусности.

Решая уравнение (2.42) получим [90]:

$$\ln V_x = \ln e^{-k_n x} + \ln C_1, \quad (2.43)$$

или:

$$V_x = C_1 e^{-k_n x}. \quad (2.44)$$

При $x = 0$ $V_x = V_{ИБ}$, т.е.:

$$C_1 = V_{ИБ}. \quad (2.45)$$

Следовательно:

$$V_x = V_{ИБ} e^{-k_n x}. \quad (2.46)$$

Интегрируя выражение (2.46) получим [90]:

$$\frac{1}{k_n} e^{k_n x} = V_{ИБ} t + C_2. \quad (2.47)$$

При $t = 0$; $x = 0$; $C_2 = \frac{1}{k_n}$.

Тогда, после некоторых преобразований, получим:

$$x = \frac{1}{k_{II}} \ln(k_{II} V_{ИБ} t + 1). \quad (2.48)$$

График, построенный на основании уравнения (2.48) при $H_{ИБ} = 0,05$ м приведен на рисунке 2.10.

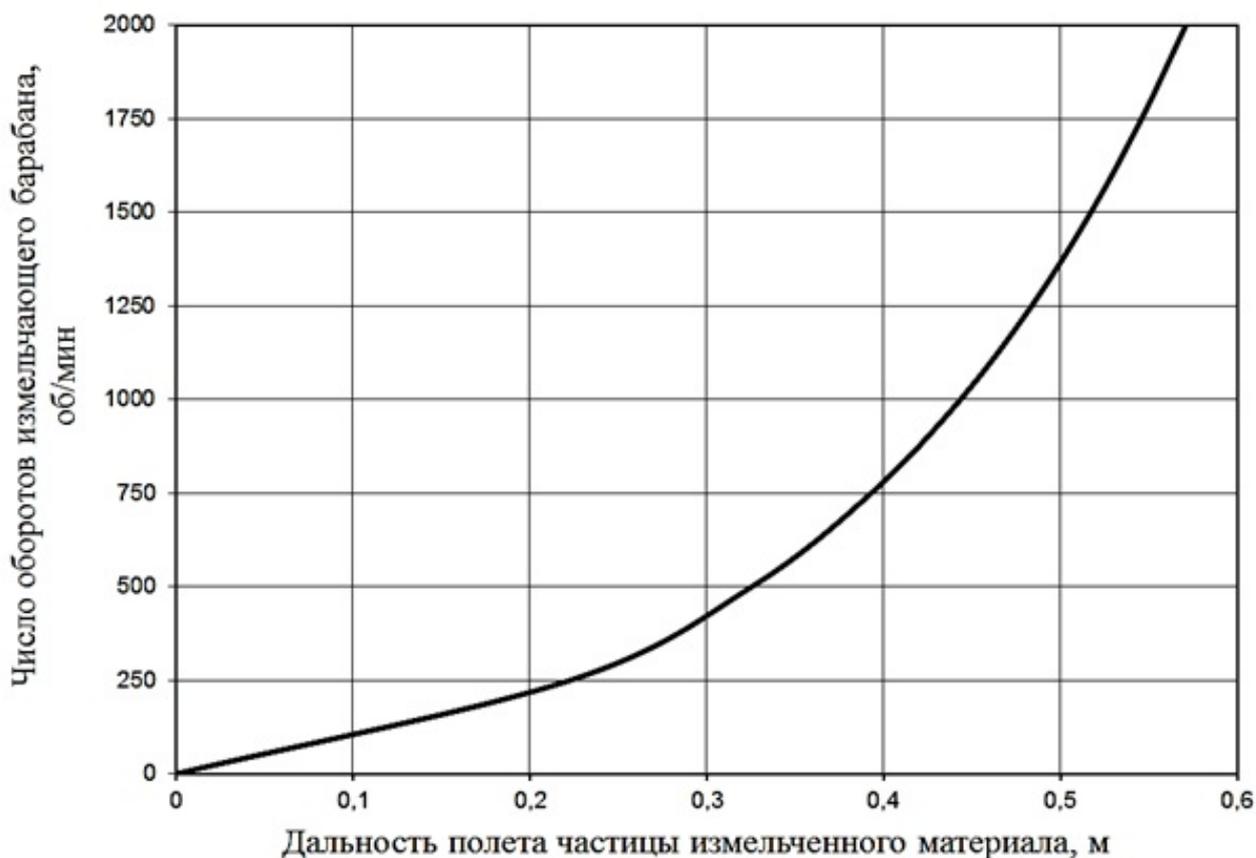


Рисунок 2.10 – Зависимость дальности полета частицы мульчи от числа оборотов измельчающего барабана

Для определения траектории движения частицы измельченного материала после ее схода с ножа измельчающего барабана рассмотрено ее движение по вертикали. Из (2.39) получим [30, 90]:

$$\ddot{y} = -g - k_{II}(\dot{y})^2. \quad (2.49)$$

После некоторых преобразований [30] получим:

$$y = C_3 - \frac{1}{2k_{II}} \ln \left\{ g \left[1 + tg^2 \left(\sqrt{k_{II}g} (C_4 - t) \right) \right] \right\} \quad (2.50)$$

При $y = H_{ИБ}$ и $V_y = V_{ИМ}$:

$$C_3 = H_{ИБ} + \frac{1}{2k_{II}} \ln \left(g + k_{II} V_{ИМ}^2 \right). \quad (2.51)$$

При $y = H_{ИБ}$ и $t = 0$:

$$C_4 = \frac{1}{\sqrt{k_{II}g}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{g} e^{2k_{II} \left\{ H_{ИБ} + \frac{1}{2k_{II}} \ln(g + k_{II} V_{ИМ}^2) \right\}} - 1}. \quad (2.52)$$

Таким образом, уравнение движения частицы измельченного материала в вертикальной плоскости примет вид [90]:

$$y = H_{ИБ} + \frac{1}{2k_{II}} \ln \left(g + k_{II} V_{ИМ}^2 \right) - \frac{1}{2k_{II}} \ln \left\{ g \left[1 + tg^2 \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{g} e^{2k_{II} \left\{ H_{ИБ} + \frac{1}{2k_{II}} \ln(g + k_{II} V_{ИМ}^2) \right\}} - 1} - t \sqrt{k_{II}g} \right) \right] \right\}. \quad (2.53)$$

С учетом того, что:

$$t = \frac{1}{k_{II} V_0} (e^{x k_{II}} - 1), \quad (2.54)$$

Окончательно получим:

$$y = H_p + \frac{1}{2k_{II}} \ln(g + k_{II} V_0^2) - \frac{1}{2k_{II}} \ln \left\{ g \left[1 + t g^2 \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{g} e^{2k_{II} \left\{ H_p + \frac{1}{2k_{II}} \ln(g + k_{II} V_0^2) \right\}} - 1 - \frac{\sqrt{k_{II} g}}{k_{II} V_0} (e^{x k_{II}} - 1)} \right)} \right] \right\}. \quad (2.55)$$

График, построенный на основании уравнения (2.55) при $n = 2000$ об/мин и $H_{ИБ} = 0,5$ м приведен на рисунке 2.11.

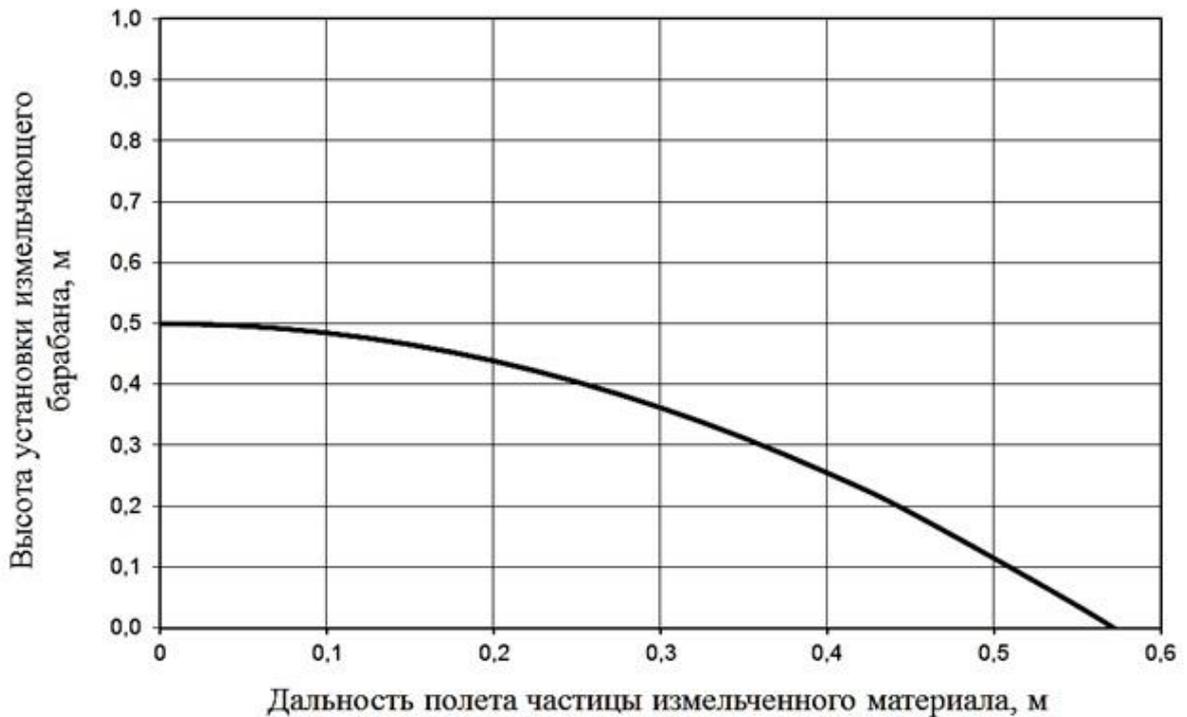


Рисунок 2.11 – Траектория полета частицы измельченного материала после схода с ножа измельчающего барабана

2.5 Выводы

1. Обоснована конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых толстостебельных кормов, обеспечивающая эффективное измельчение кормов при минимальных энергетических затратах.

2. Проведенные теоретические исследования процесса взаимодействия рабочего органа измельчителя с измельчаемым материалом позволили получить: аналитические зависимости по определению сил, возникающих в процессе резания кормов; зазора между режущими и противорежущими ножами; работы и мощности, затрачиваемые на измельчение исходного материала; общей мощности, потребляемую измельчителем в процессе работы; производительности измельчителя; степени и энергоемкости измельчения материала.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

3.1 Программа, методика экспериментальных исследований, описание экспериментальной установки и измерительная аппаратура

Цель экспериментальных исследований: подтверждение теоретических предпосылок повышения надежности измельчителей грубых толстостебельных кормов. Исследованиями устанавливаем закономерности процесса измельчения корма, что позволит установить конструктивные параметры для нового экспериментального измельчителя. Результаты исследований имеют научную и практическую ценность для улучшения работы измельчителей для повышения их эффективности.

Для проверки и дополнения основной теоретической информации (раздел 2), направленной на повышение эффективности измельчителей путем снижения энергоемкости измельчения корма, предложена следующая программа экспериментальных исследований:

- исследование физико-механических свойств грубых толстостебельных кормов;
- определение основных факторов, влияющих на энергоемкость процесса измельчения грубых толстостебельных кормов разработанным измельчителем;
- оптимизировать параметры и режимы работы разработанного измельчителя.

Опыты проведены по разработанной комплексной методике, включавшей оригинальные и известные методики [18, 19, 41, 45, 51, 74].

Экспериментальные исследования опытного образца измельчителя грубых кормов проведены в крестьянских (фермерских) хозяйствах «Инжижоков Заурби Муаедович» (с.п. Аргудан, Лескенский район, КБР) и «Апеков Алим Нарикович» (с.п. Анзорей, Лескенский район, КБР).

Исследования проводились в соответствии со стандартами [34, 35, 36, 37, 82].

Исследование процесса измельчения на экспериментальной установке проводилось на стеблях и початках кукурузы (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Стебли и початки кукурузы, подлежащие измельчению

В процессе взаимодействия измельчаемого материала с поверхностью транспортера возникает внешнее трение скольжения. Рассмотрим частицу измельчаемого материала массой m , лежащую на плоскости $K-K$ (рисунок 3.2). При этом силу тяжести частицы G уравнивает реакция опоры N .

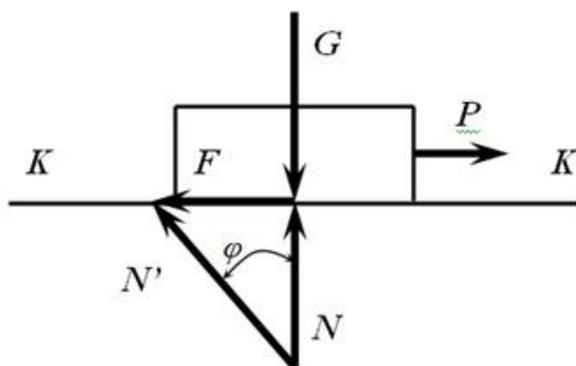


Рисунок 3.2 – Схема сил, действующих на измельчаемый материал

Допустим, что частица, кроме силы тяжести, находится под действием некоторой горизонтальной силы P , которая стремится сдвинуть частицу по плоскости $K-K$.

В состоянии покоя указанная система будет находиться до тех пор, пока сила трения F и реакция N пропорциональны:

$$F = kN, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент трения, который зависит от материала соприкасающихся тел.

После построения силового многоугольника, определяется результирующая сила N' , отклоненная от нормали на угол φ , причем:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{F}{N}. \quad (3.2)$$

Сравнение выражений (3.1) и (3.2) свидетельствует о том, что:

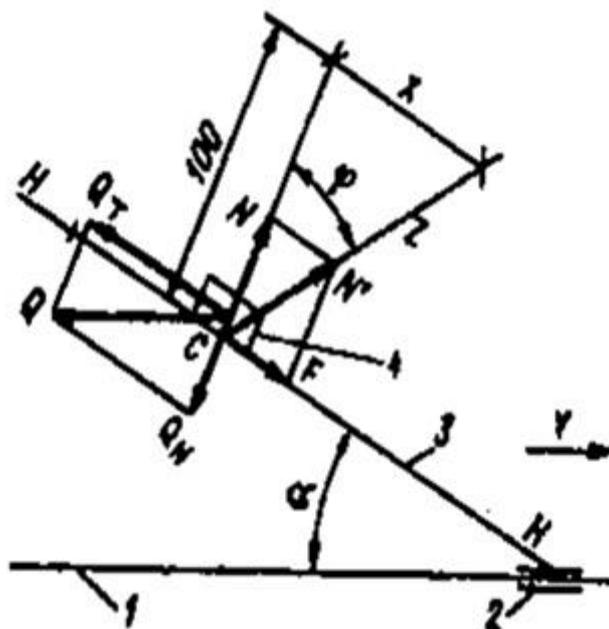
$$\operatorname{tg}\varphi = k. \quad (3.3)$$

где φ – угол между реакциями N' и N .

Коэффициент трения устанавливался с использованием наклонной плоскости (рисунки 3.3, 3.4).

Линейка 3 располагается под углом α к направлению движения V и к ней в произвольной точке подсоединена коробка 4 с образцом обрабатываемого материала C . В процессе движения линейки коробка с образцом измельчаемого материала сопротивляется перемещению. Это сопротивление Q раскладывается на

две составляющие: нормальная Q_N и касательная Q_T . Скольжение образца измельчаемого материала по поверхности линейки имеет место при условии $Q > F$.



1 – чертежная доска с бумагой; 2 – направляющая; 3 – линейка; 4 – коробка
Рисунок 3.3 – Схема установки для определения коэффициента трения



Рисунок 3.4 – Установка для определения коэффициента трения

В этом случае коробка образцом измельчаемого материала перемещается по траектории, которая совпадает с траекторией силы N' (резльтирующая сил N (реакция силы Q_N) и F). Так как коробка укомплектована механизмом записи, траектория коробки переносится на лист бумаги.

Проведя нормаль к плоскости рейки $H-H$, можно установить искомый угол трения измельчаемого материала о материал рейки: это угол между нормалью и начерченной траекторией. Данный угол может быть измерен с использованием транспортира. Также можно установить значение коэффициента трения по следующей зависимости:

$$k = \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{100}. \quad (3.4)$$

Исследования проведены со стеблями кукурузы длиной 100-150 см [118].

Секундную производительность устанавливали по зависимости:

$$Q_{из} = 3600 \frac{q}{t}, \quad (3.5)$$

где q – масса поданных за время опыта стеблей кукурузы, кг; t – время опыта, с.

Величину подачи устанавливали по значению $Q_{из}$, равномерность подачи – по разнице между Q_1, Q_2, \dots, Q_n [31, 32, 118].

Фракционный состав конечного продукта исследовали после измельчения стеблей кукурузы на лабораторной установке [32].

Основной критерий оценки качества конечного продукта – степень измельчения. В качестве критерия оценки степени измельчения использовали показатель M , называемый модулем крупности, рассчитываемый по выражению:

$$M = \frac{0,5P_0 + 1,5P_1 + 2,5P_2 + 3,5P_3}{100}, \quad (3.6)$$

где P_0 – количество материала, прошедшего через сито, имеющее отверстия $\emptyset 0,25$ мм, %; P_1, P_2, P_3 – количество остатка на ситах, имеющих отверстия, соответственно, $\emptyset 1, 2$ и 3 мм, %.

Основным показателем процесса измельчения стеблей кукурузы в измельчителе считается энергоёмкость процесса измельчения, обеспечивающего заданный гранулометрический состав. Она устанавливалась с использованием зависимости (2.37).

Снижение предельной ошибки достигается путем систематического тарирования и проверки применяемых измерительных приборов.

Предельную относительную ошибку величины удельного расхода энергии рассчитали по выражению [90]:

$$\frac{\Delta n(\mathcal{E}_{уд})}{\mathcal{E}_{уд}} = \pm \left[\frac{\Delta n(\mathcal{E}_{эф})}{\mathcal{E}_{эф}} + \frac{\Delta n(Q_{из})}{Q_{из}} \right] = \pm (0,5 + 1,55) = \pm 2,05\%. \quad (3.7)$$

В ходе определения производительности величина предельной относительно ошибки устанавливалась по выражению [85]:

$$\frac{\Delta n(Q_{из})}{Q_{из}} = \pm \left[\frac{\Delta n(q)}{q} + \frac{\Delta n(t)}{t} \right], \quad (3.8)$$

где q – масса пробы, кг; t – время проведения опыта, с; Δn – величина отклонения измеряемой величины.

Предельную ошибку измерительной техники принимали согласно их технических характеристик [90]:

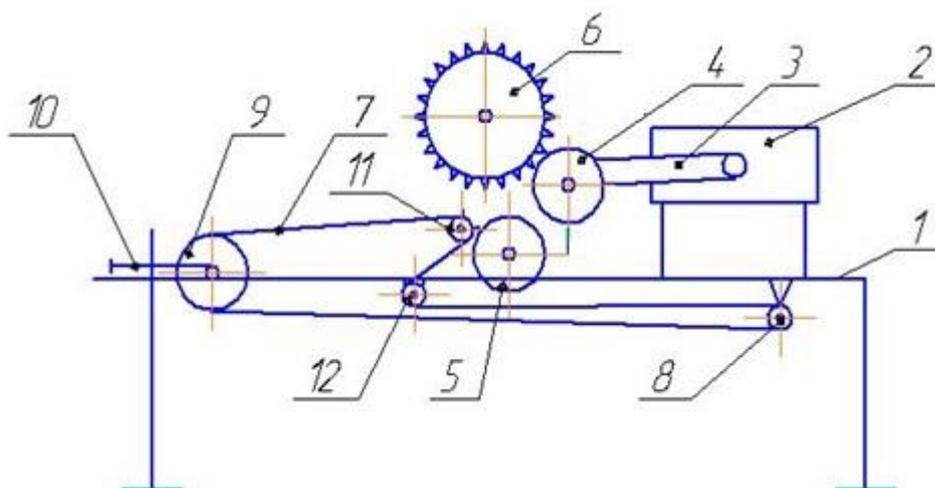
$$\frac{\Delta n(q)}{q} = \pm 0,1\%, \frac{\Delta n(t)}{t} = \pm 0,55\%. \quad (3.9)$$

При этом:

$$\frac{\Delta n(Q_{из})}{Q_{из}} = \pm(0,1 + 0,5) = \pm 0,65\%. \quad (3.10)$$

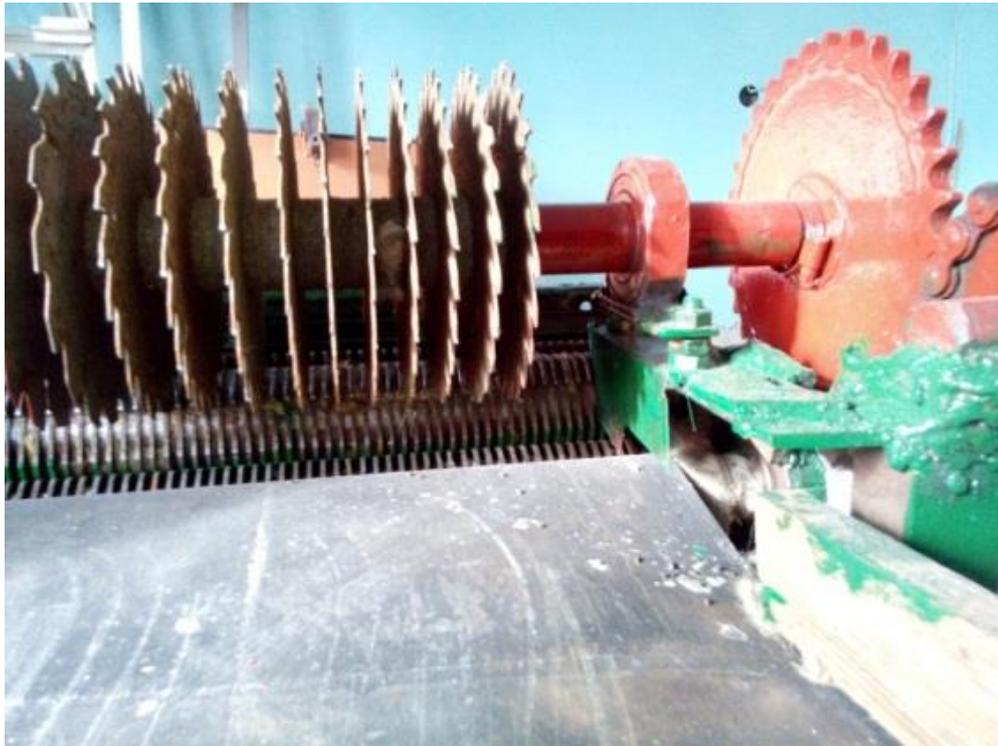
Подбор используемого оборудования производился с учетом оценки их точности по значению максимально возможной статистической ошибки [1, 19, 51, 69, 72, 90].

Экспериментальная установка показана на рисунках 3.5-3.7.

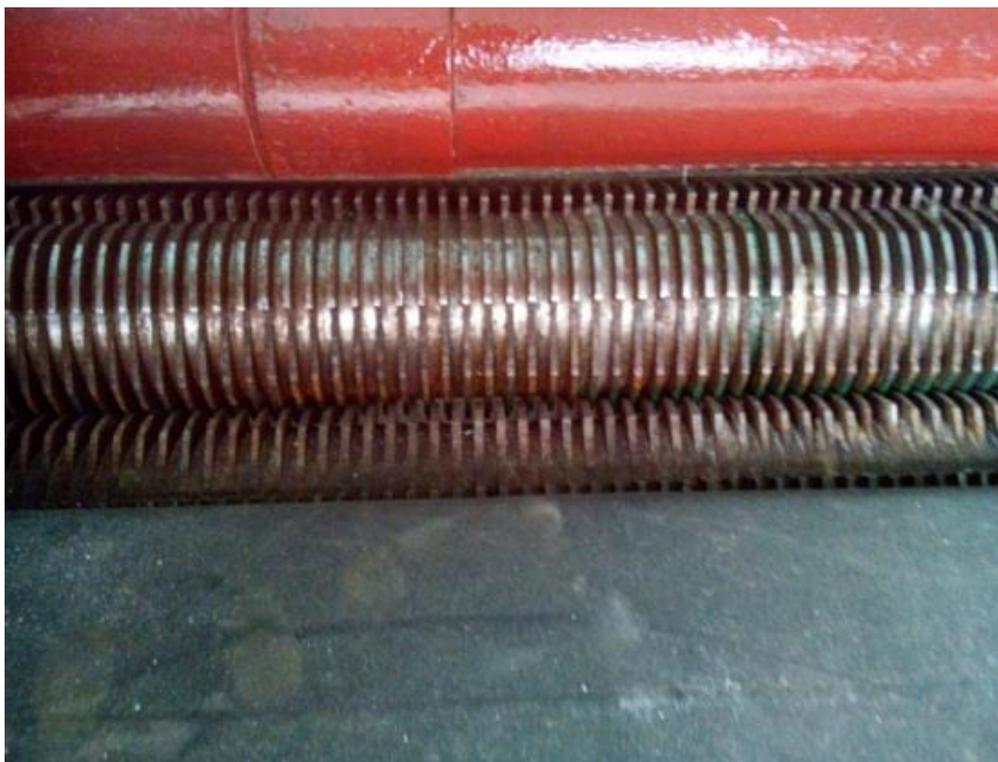


1 – стойка; 2 – двигатель; 3 – механизм привода; 4 – основной вал с режущими ножами; 5 – подающий вал с противорежущими ножами; 6 – вал с циркуляционными дисками, 7 – транспортер, 8, 9 – ведущий и ведомый валы транспортера, 10, 11 и 12 механизмы натяжения 10, 11 и 12 транспортера

Рисунок 3.5 – Схема экспериментальной установки



а)



б)

Рисунок 3.6 – Общий вид вала с циркуляционными дисками (а), основного вала с режущими ножами и подающего вала с противорежущими ножами (б)



а)



б)

а – клиноременная передача для привода основного вала с режущими ножами и ленточного транспортера; б – цепная передача для привода вала с циркуляционными дисками и подающего вала с противорежущими ножами

Рисунок 3.7 – Механизмы привода рабочих органов измельчителя

Окружную скорость рабочего органа определяли по зависимости [6, 68]:

$$V_B = \frac{\pi n_B R_{PO}}{30}, \quad (3.11)$$

где n_B – частота вращения вала измельчителя, мин^{-1} ; R_{PO} – радиус вала, м.

Частоту вращения валов измельчителя устанавливали при установившемся режиме работы [85] с использованием тахометра Т410-Р с точностью до $0,1 \text{ мин}^{-1}$.

Рабочие органы приводятся в движение от двигателя ДБ 200/К6,5 (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Техническая характеристика двигателя ДБ 200/К6,5

Параметры	Модель ДБ 200/К6,5
1. Мощность двигателя, кВт	4,8
2. Тип двигателя	4-х тактный
3. Частота вращения выходного вала, мин^{-1}	3600
4. Диаметр выходного вала, мм	19
5. Тип топлива	Бензин АИ 92
6. Система старта	Ручной старт
7. Система зажигания	Электронное
8. Охлаждение двигателя	Воздушное
9. Масса, кг	18

Техническая характеристика измельчителя грубых толстостебельных кормов представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Техническая характеристика измельчителя грубых толстостебельных кормов

№ п/п	Показатели	Значение
1.	Производительность, т/ч при измельчении: - стебля и стержня кукурузы - сена и соломы	0,9 2-3
2.	Длина резки, мм	10-50
3.	Мощность двигателя, кВт	4,8
4.	Число оборотов барабанов, мин ⁻¹ - верхнего измельчительного барабана - нижнего измельчительного барабана	2000 100
5.	Тип питателя	Ленточный транспортер
6.	Скорость подачи, м/с	0,08
7.	Обслуживающий персонал, чел.	1

Применение в измельчителе двух валов позволяет исключить забивание рабочих органов измельчаемым материалом, так как вал с режущими ножами вращается быстрее, чем с противорежущими.

Конструкция измельчителя допускает применение электродвигателей малой мощности (4-5 кВт), что позволяет снизить энергоемкость процесса измельчения грубых толстостебельных кормов.

Исследования измельчителя проводились в соответствии с ГОСТ 20915-2011, ГОСТ Р 54783-2011, ГОСТ Р ИСО 6497-2011, ГОСТ 12.2.042-2013 и ОСТ 70.19.2-74 [34, 35, 36, 37, 82].

Механической характеристикой называется зависимость скорости от нагрузки на валу двигателя или механизма. Эта характеристика может быть записана в виде уравнения и отображена в форме графика в прямоугольной координатной системе ω , M (рисунок 3.8) [15, 30, 33, 81, 123].

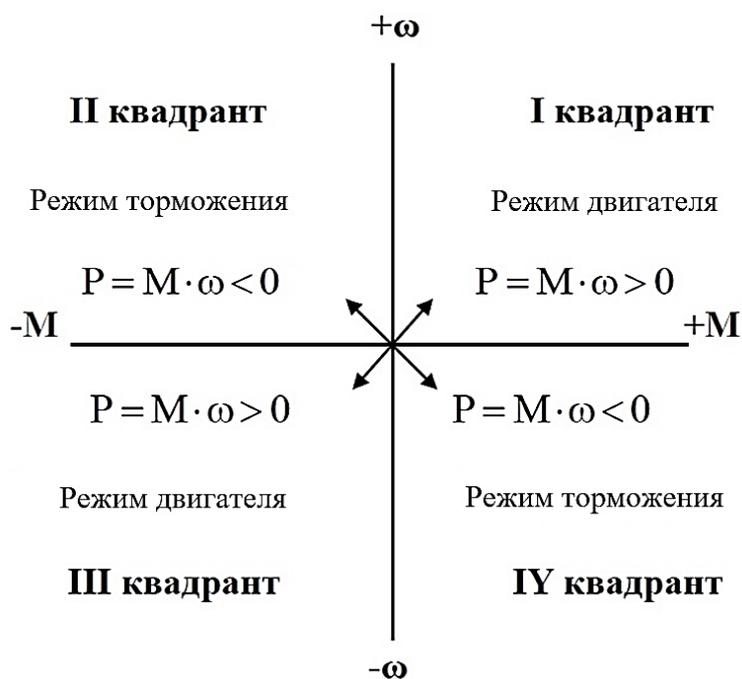


Рисунок 3.8 – Квадранты механических характеристик

Оси координат разделяют плоскость на четыре части или квадранты, каждый из которых имеет свой номер. Отсчет квадрантов начинается от правого верхнего (I квадрант) против движения стрелки часов. Нахождение характеристики в каком-то квадранте имеет определенный физический смысл, определяемый знаком мощности $P = M\omega$. Характеристики, находящиеся в I и III квадрантах, соответствуют режиму двигателя, когда происходит преобразование энергии в направлении от сети к механизму, $P > 0$.

Характеристики, находящиеся во II и IV квадрантах, соответствуют режиму торможения, когда происходит преобразование энергии в обратном направлении, а мощность имеет отрицательный знак, $P < 0$.

Режимы двигателя в I и III или торможения во II и IV квадрантах равноценны между собой, и отличаются только направлением движения вала двигателя. Например, при передвижении вперед (I квадрант) и обратно (II квадрант) электропривод работает в режиме двигателя.

Промежуточные положения характеристик электродвигателей также отображают состояние или режим электропривода. Так, когда $\omega \neq 0$, а момент

равен нулю, имеем нерабочий или холостой ход, а когда $\omega = 0$, а $M \neq 0$, имеем режим короткого замыкания.

Иногда речь может идти о характеристиках, расположенных в верхней полуплоскости, при положительной скорости или в нижней полуплоскости, при отрицательной скорости. Также возможна ссылка на правую или на левую полуплоскости в заданной системе координат.

Когда рассматривается механическая характеристика двигателя, важно знать, как изменяется скорость двигателя, если на его вал подать нагрузку в виде момента, то есть используется функция $\omega = f(M)$. Когда рассматривается механическая характеристика механизма, наоборот, важно знать, какая нагрузка создает механизм двигателя при определенной скорости, описываемой функцией $M = f(\omega)$, хотя обе характеристики отображаются в одной системе координат.

Способность двигателя изменять скорость от момента на валу может быть полезна, если речь идет о примерах перегрузки или некоторых переходных процессах, но она часто рассматривается как отрицательное свойство электропривода. Описывается это свойство с помощью коэффициента жесткости β :

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega},$$

где, $\Delta \omega$ ΔM – изменение (прирост) скорости под влиянием изменения (прироста) момента.

Жесткость может быть положительной или отрицательной, устремляться к бесконечности или к нулю. С этой точки зрения характеристики двигателей можно оценить как абсолютно жесткие (синхронный двигатель СД, $\beta \rightarrow \infty$), жесткие (двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), рабочая часть характеристики асинхронного двигателя АД), имеющие небольшой наклон механической характеристики, мягкие (двигатель постоянного тока

последовательного возбуждения (ДПТ ПВ), у которого наклон характеристики достаточно ощутим и значительно изменяющий скорость при изменении момента). Все рабочие части механических характеристик этих двигателей имеют отрицательную жесткость. На некоторых участках характеристик, например, при критическом скольжении АД, характеристика приближается к вертикали, когда жесткость идет к нулю. В некоторых случаях вертикальная характеристика создается искусственно. Жесткость таких характеристик стремится к нулю.

Эксперименты проведены с использованием однофазного коллекторного двигателя переменного тока типа JUICERCT-1206 ($N_H = 0,8$ кВт; $U_H = 220$ В; $n_H = 1500$ об/мин; $I_H = 0,8$ А).

Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с использованием существующих методов и ПЭВМ [1, 11, 45, 69, 72, 134, 136].

Анализ факторов, влияющих на энергоемкость измельчения грубых кормов предлагаемым измельчителем, показал, что в наибольшей степени на эти показатели влияют: число оборотов режущих ножей (n_{PH} , мин⁻¹); межосевое расстояние между основным и подающим валами (S_H , м); скорость подачи исходного материала ($V_{ИМ}$, м/с) (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Основные факторы и уровни их варьирования

Факторы Значение	Число оборотов режущих ножей, мин ⁻¹			Межосевое расстояние между основным и подающим валами, м			Скорость подачи исходного материала, м/с		
	X_1								
Кодированное (безразмерное)	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
	n_{PH} , мин ⁻¹			S_H , м			$V_{ИМ}$, м/с		
Натуральное	1500	2000	2500	0,092	0,095	0,098	0,04	0,08	0,12

При проведении экспериментальных исследований количество опытов рассчитывается по выражению:

$$N = 2^k + 2k + n_0, \quad (3.12)$$

где 2^k – ядро плана; $2k$ – звездные точки; n_0 – центр эксперимента.

Расчеты по зависимости (3.12) показали, что $N = 16$.

Реализации плана эксперимента предвзяла рандомизация опытов, которые предусмотрены в плане матрицы эксперимента, с использованием таблицы случайных чисел.

Варьирование значений основных факторов при исследовании энергоемкости процесса измельчения грубых кормов принято согласно таблице 3.3.

Математическая модель функции отклика запишется в виде:

$$Y = b_o + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2, \quad (3.13)$$

где b_o, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии; X_i, X_j – значения факторов в кодированном виде.

В случае $k = 3$, выражение (3.21) запишется в форме:

$$Y = b_o + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 \quad (3.14)$$

Процедура обработки результатов, приведенных в матрице планирования эксперимента, предусматривала их дисперсионный и регрессионный анализ [1].

3.2 Физико-механические свойства измельчаемого материала

Особенности работы измельчителя при измельчении толстостебельных культур, к которым относится кукурузы, обусловлены их физико-механическими свойствами. Большой диаметр стеблей кукурузы (40-60 мм) требует значительного усилия и времени на перерезание.

Следует подчеркнуть, что при создании расчетных моделей процесса резания необходимо учитывать стадии спелости обрабатываемого растительного материала и дискретность данного фактора. К примеру, стебли кукурузы срезаются исключительно при молочно-восковой спелости или при полной спелости зерна. Учитывая данное обстоятельство, при проведении исследований использовались стебли кукурузы в стадии полной спелости.

Результаты анализа некоторых физико-механических характеристик органов кукурузного растения приведены в таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4 – Влажность и вес органов кукурузного растения (среднее за период уборки на зерно)

Наименование	Влажность, %	Вес на 1 растение, г	Вес на 1 га, ц
Початки	29	242	50
Стебли, листья	10-41	218	45
Всего растения	31	460	95

В результате проведенных исследований установлено, что коэффициент трения стеблей кукурузы зависит от их влажности, и при скольжении по резине изменяется в пределах 0,82-1,04. Угол трения стеблей кукурузы изменяется в пределах 39° - 46° .

Таблица 3.5 – Насыпной (объемный) вес кукурузных продуктов

Наименование продукта	Влажность, %	Насыпной вес, кг/м ³	Состояние продукта
Початки ручной уборки	27	460-470	Початки тщательно очищены от рубашек
Початки машинной очистки	24	360-380	Початки недоочищены от рубашек на 25%
Початки машинной очистки	21	340-350	Початки недоочищены от рубашек на 30%
Початки машинной очистки	17	330-340	Початки недоочищены от рубашек на 35%
Растения с початками	40	100-110	Растения ручной уборки, свежие
Растения с початками	40	70-80	Растения, убранные машиной, свежие
Растения без початков	40	35-50	Растения ручной уборки, свежие
Измельченная листостебельная масса	30-40	50-80	Преобладает стебельная масса
Измельченная листостебельная масса	15-20	20-30	Преобладает листовая масса

3.3 Влияние частоты вращения подающего транспортера на равномерность подачи измельчаемого материала к рабочим органам измельчителя

Зависимость равномерности подачи измельчаемого материала Δq_{II} от частоты вращения вала подающего транспортера n_T (стебли кукурузы) приведена на рисунке 3.9.

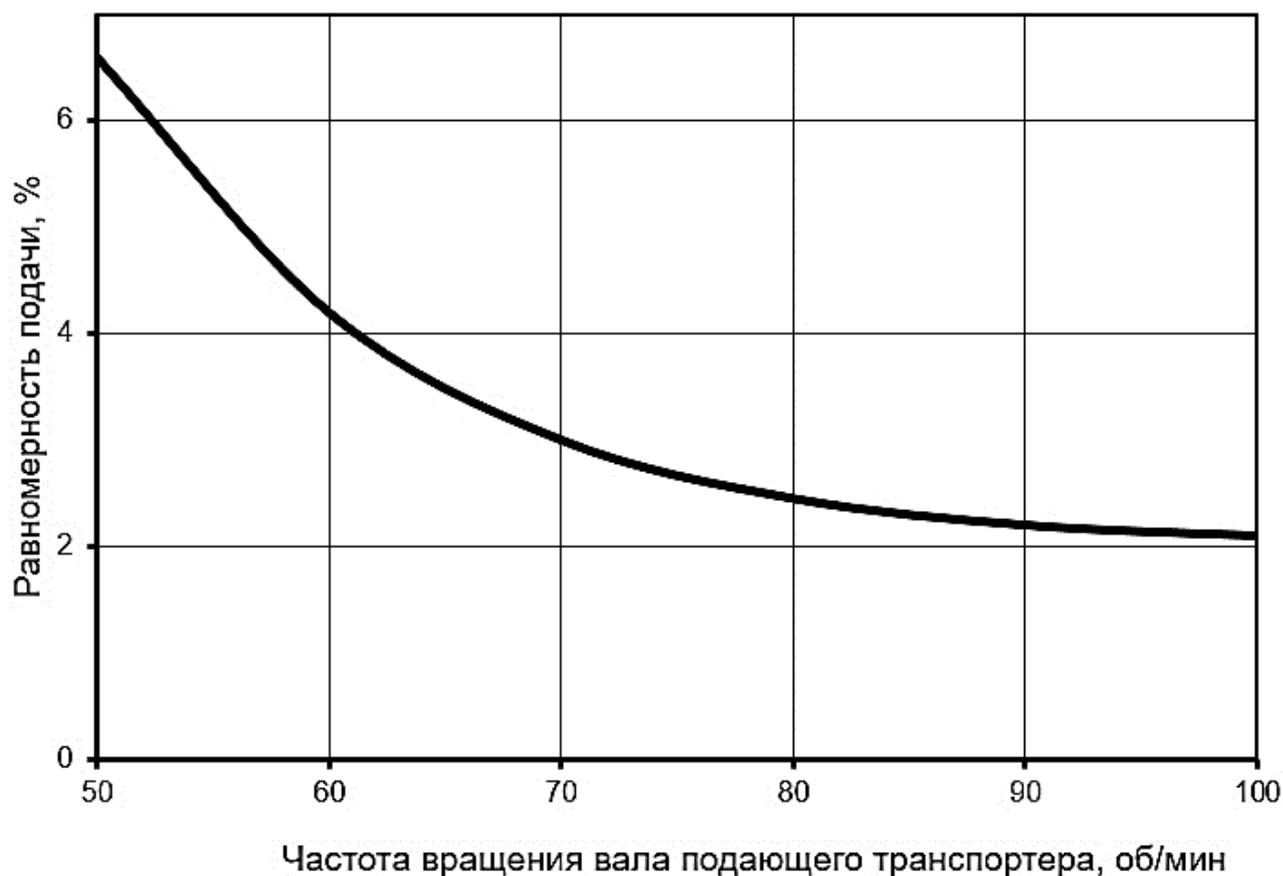


Рисунок 3.9 – Зависимость равномерности подачи измельчаемого материала от частоты вращения вала подающего транспортера (стебли кукурузы)

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что предлагаемая конструкция подающего транспортера обеспечивает требуемую равномерность потока измельчаемого материала к рабочим органам измельчителя в интервале частот вращения n_T вала подающего транспортера 80-90 об/мин [118].

3.4 Влияние числа оборотов основного вала с режущими ножами и относительной влажности исходного материала на производительность измельчителя

В результате теоретических исследований установлено, что производительность процесса резания возрастает до некоторого значения с увеличением числа оборотов, что объясняется ускорением процесса, а затем достаточно быстрое снижается вследствие того, что рабочий орган не успевает захватить измельчаемый материал. При различной относительной влажности измельчаемого материала максимальное значение производительности имело место при числе оборотов 1500-2500 мин⁻¹.

Опыты были проведены для проверки полученных зависимостей. Обработка результатов сводилась к установлению зависимости производительности установки ($Q_{ИЗ}$, кг/ч) от числа оборотов основного вала (n_{PH} , мин⁻¹) и влажности измельчаемого материала ($W_{ОТН}$). Установлена приемлемая сходимость результатов (до 5%).

Анализ результатов исследования зависимости производительности измельчителя от числа оборотов основного вала для различных значений влажности стеблей кукурузы (рисунок 3.10) показал, что при числах оборотов основного вала, равных 1850-2050 мин⁻¹, обеспечивается максимальная производительности независимо от влажности материала [118].

В указанных пределах рабочие органы оптимально функционируют, происходит эффективное расщепление продольных волокон перерезаемого слоя (процесс нормального резания), отрезаются частицы необходимых размерных фракций.

Анализ полученных результатов показывает, что относительная влажность также заметно влияет на производительность измельчительного устройства.

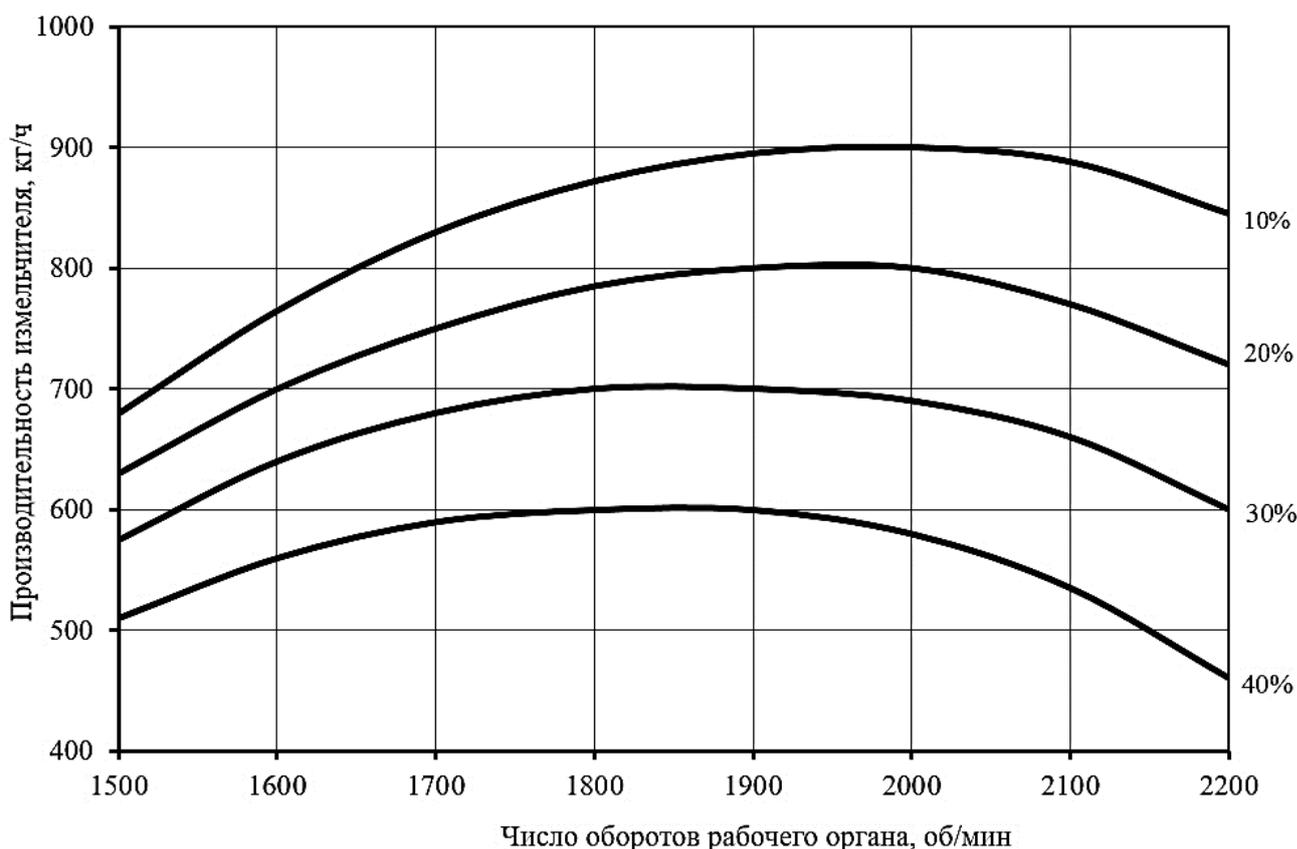


Рисунок 3.10 – Зависимость производительности измельчителя от числа оборотов основного вала для различных значений влажности стеблей кукурузы

При исследовании зависимости производительности измельчителя от относительной влажности материала Измельчению подвергался исходный материал, имеющий относительную влажность 10-40%. Для измельчения материала с такой влажностью рациональной является частота вращения основного вала, равная 2000 мин⁻¹. Результаты, на основании которых построены графики на рисунке 3.11 подтверждают экспериментальные данные, которые получены при ранее проведенных экспериментах.

Таким образом, оптимизационные исследования следует проводить при базовом уровне частоты вращения основного вала, равном 2000 мин⁻¹. Эксперименты проведены с интервалом варьирования частоты вращения основного вала (рисунок 3.11), равным ± 500 об/мин.

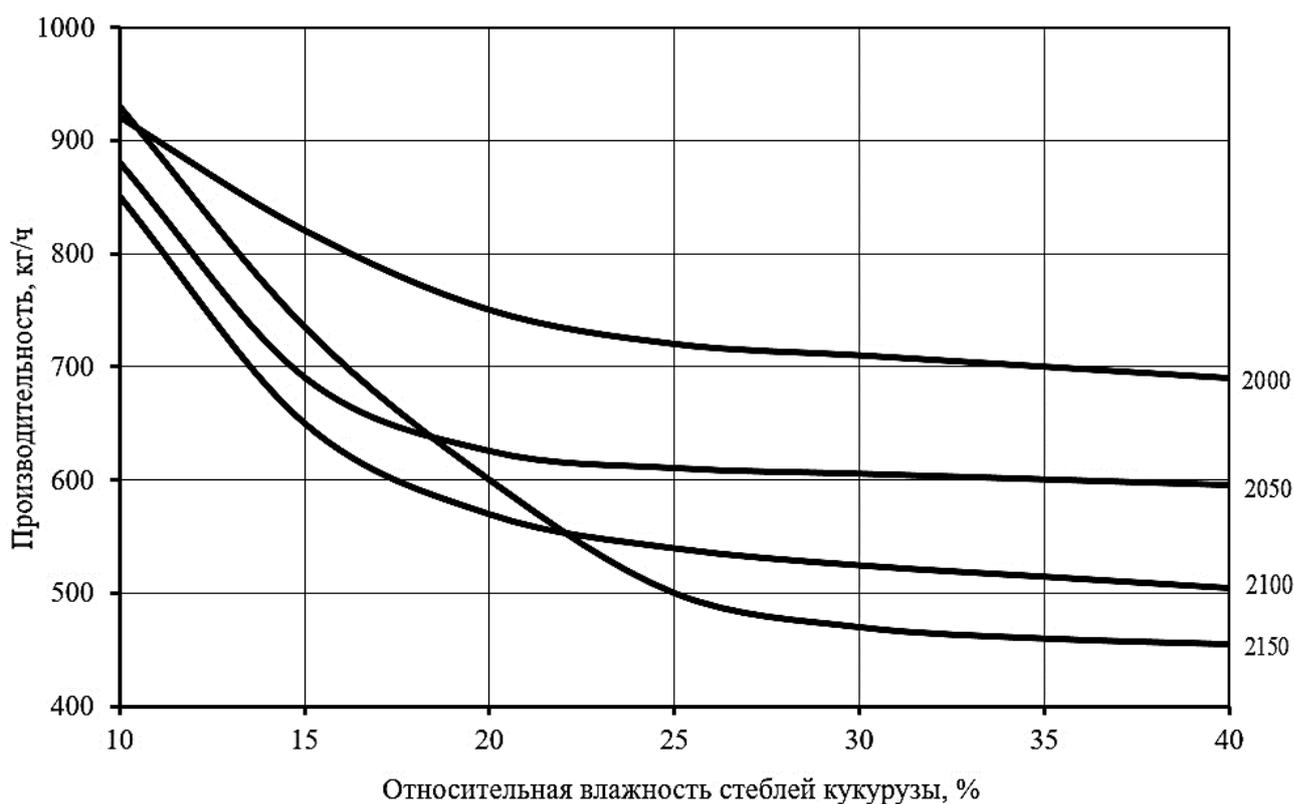


Рисунок 3.11 – Зависимость производительности измельчителя от относительной влажности обрабатываемого материала (стебли кукурузы) для различных значений числа оборотов основного вала

3.5 Оптимизация основных параметров и режима работы измельчителя грубых толстостебельных кормов

Для установления оптимальных конструктивно-режимных параметров измельчителя грубых толстостебельных кормов, при которых обеспечивается минимальная энергоемкость измельчения, реализован многофакторный эксперимент, результаты которого приведены в таблицах 3.6-3.8 [29].

Значимость коэффициентов регрессии оценивали по условию:

$$|b| > \Delta b, \quad (3.15)$$

где $|b|$ – значение коэффициента регрессии по модулю; Δb – значение доверительного интервала.

Таблица 3.6 – Результаты реализации матрицы планирования (критерий оптимизации – энергоёмкость измельчения $\mathcal{E}_{из}$, кВт·ч/т)

i	Фактор			Отклик			
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_{cp}
1	1	1	0	8,86	8,36	9,36	8,86
2	1	-1	0	9,36	9,86	12,36	10,53
3	-1	1	0	6,36	9,36	7,86	7,86
4	-1	-1	0	11,36	8,86	10,36	10,19
5	0	0	0	1,86	2,36	0,86	1,69
6	1	0	1	11,36	9,36	5,86	8,86
7	1	0	-1	12,86	12,66	12,86	12,79
8	-1	0	1	5,86	9,36	7,86	7,69
9	-1	0	-1	9,86	11,86	14,86	12,19
10	0	0	0	2,86	0,86	0,86	1,53
11	0	1	1	4,86	6,36	7,36	6,19
12	0	1	-1	11,36	10,86	9,86	10,69
13	0	-1	1	8,36	9,86	5,76	7,99
14	0	-1	-1	15,36	12,86	10,36	12,86
15	0	0	0	1,86	0,86	2,86	1,86

Формулы перехода от кодированных координат к натуральным координатам следующие:

$$X_1 = \frac{n_{PH} - 2000}{500}, \quad (3.16)$$

$$X_2 = \frac{S_H - 0,01}{0,005}, \quad (3.17)$$

$$X_3 = \frac{V_{ИМ} - 0,08}{0,04}. \quad (3.18)$$

Таблица 3.7 – Значения коэффициентов регрессии

Расчетная формула	Критерий оптимизации
	$\mathcal{E}_{ИЗ}$
$b_o = a_1 \sum_{u=1}^N Y_{ucp} - a_2 \sum_{u=1}^N (X_{1u}^2 + X_{2u}^2 + X_{3u}^2) \cdot Y_{ucp}$	1,6933
$b_1 = a_3 \sum_{U=1}^N X_{1u} Y_{ucp} / N$	0,3888
$b_2 = a_3 \sum_{U=1}^N X_{2u} Y_{ucp} / N$	-0,9963
$b_3 = a_3 \sum_{U=1}^N X_{3u} Y_{ucp} / N$	-2,225
$b_{12} = a_4 \sum_{u=1}^N X_{1u} X_{2u} Y_{ucp}$	0,165
$b_{13} = a_4 \sum_{u=1}^N X_{1u} X_{3u} Y_{ucp}$	0,143
$b_{23} = a_4 \sum_{u=1}^N X_{2u} X_{3u} Y_{ucp}$	0,0925
$b_{11} = a_5 \sum_{u=1}^N X_{1u}^2 Y_{ucp} + a_6 \sum_{u=1}^N (X_{1u}^2 + X_{2u}^2 + X_{3u}^2) \cdot Y_{ucp} - a_7 \sum_{u=1}^N Y_{ucp}$	4,3084
$b_{22} = a_5 \sum_{u=1}^N X_{2u}^2 Y_{ucp} + a_6 \sum_{u=1}^N (X_{1u}^2 + X_{2u}^2 + X_{3u}^2) \cdot Y_{ucp} - a_7 \sum_{u=1}^N Y_{ucp}$	3,3584
$b_{33} = a_5 \sum_{u=1}^N X_{3u}^2 Y_{ucp} + a_6 \sum_{u=1}^N (X_{1u}^2 + X_{2u}^2 + X_{3u}^2) \cdot Y_{ucp} - a_7 \sum_{u=1}^N Y_{ucp}$	4,3809

Таблица 3.8 – Результаты расчетов проверки однородности дисперсий

Критерий оптимизации	Значение критерия Кохрена	
	опытные	табличные
$\mathcal{E}_{ИЗ}$	0,196	0,335

После подстановки значений X_1, X_2, X_3 в выражения (3.16), (3.17) и (3.18) и проведения некоторых преобразований, получены математические модели исследуемого процесса измельчения в натуральной форме [28]:

- критерий оптимизации – энергоёмкость измельчения $\mathcal{E}_{из}$:

- в кодированной форме:

$$Y_{\mathcal{E}_{из}} = 1,6933 + 0,3888X_1 - 0,9963X_2 - 2,225X_3 + 0,165X_1X_2 + 0,143X_1X_3 + 0,0925X_2X_3 + 4,3084X_1^2 + 3,3584X_2^2 + 4,3809X_3^2 \quad (3.19)$$

- в натуральной форме:

$$\mathcal{E}_{из} = 3518,223 - 0,0792n_{PH} - 71513,3S_H - 581,19V_{ИМ} + 0,1ln_{PH}S_H + 0,007125n_{PH}V_{ИМ} + 770,833S_HV_{ИМ} + 0,000017n_{PH}^2 + 373155,6S_H^2 + 2738,06V_{ИМ}^2. \quad (3.20)$$

Дисперсия адекватности $D_{ад}^2$:

$$D_{ад}^2 = \frac{D_R - D_E}{N - k - (n - 1)}, \quad (3.21)$$

где D_R – сумму D_R квадратов отклонений расчетных значений \tilde{y} от экспериментальных y ; k – количество значимых коэффициентов; n – количество повторности опытов.

Расчетное значение критерия Фишера $F_{расч}$:

$$F_{расч} = \frac{D_{ад}^2}{D^2\{y_i\}}. \quad (3.22)$$

Табличное значение критерия Фишера $F_{табл}$ устанавливается в зависимости от степеней свободы $f_1 = N - d$ и $f_2 = N(n - 1)$ (таблица 3.9).

Анализируя результаты, приведенные в таблице 3.9, можно заключить, что составленные математические модели адекватно описывают процесс измельчения стеблей кукурузы предлагаемым измельчителем.

Таблица 3.9 – Результаты расчетов проверки адекватности аппроксимирующих полиномов поверхностям отклика

Параметр оптимизации	$F_{расч}$	$F_{табл}$
$K_{кр}$	1,953	2,288

С целью определить значения факторов, обеспечивающих экстремум функции (3.19), составили систему уравнений (табл. 3.10).

Таблица 3.10 – Уравнения в частных производных

Критерий оптимизации
Энергоемкость измельчения $\mathcal{E}_{из}$
$\begin{cases} \frac{dY_{\mathcal{E}_{из}}}{dX_1} = 3,9221 + 0,165X_2 + 0,143X_3 + 8,6168X_1 = 0 \\ \frac{dY_{\mathcal{E}_{из}}}{X_2} = 2,537 + 0,165X_1 + 0,0925X_3 + 6,7168X_2 = 0 \\ \frac{dY_{\mathcal{E}_{из}}}{X_3} = 1,3083 + 0,143X_1 + 0,0925X_2 + 8,7618X_3 = 0 \end{cases}$

Решения данной системы уравнений:

$$X_1 = -0,0521;$$

$$X_2 = 0,146;$$

$$X_3 = 0,2532.$$

Установлены оптимальные значения основных параметров измельчителя грубых кормов, обеспечивающие минимум энергоемкости измельчения грубых кормов (1,33 кВт·ч/т.): число оборотов режущих ножей $n_{PH} = 1974$ об/мин; зазор между режущими и противорежущими ножами $S_H = 0,095$ и скорость подачи исходного материала $V_{ИМ} = 0,09$ м/с.

Согласно уравнениям, приведенным в таблице 3.11, построены зависимости энергоемкости измельчения грубых кормов от исследуемых параметров (рисунки 3.12-3.14) [28].

Таблица 3.11 - Зависимости критерия оптимизации от одного исследуемого параметра

Критерий оптимизации
Энергоемкость измельчения грубых кормов $\mathcal{E}_{ИЗ}$
$Y_{\mathcal{E}_{ИЗ}}(X_1) = 1,0595 + 0,4491X_1 + 4,3084X_1^2;$
$Y_{\mathcal{E}_{ИЗ}}(X_2) = 1,4003 - 0,9815X_2 + 3,3584X_2^2;$
$Y_{\mathcal{E}_{ИЗ}}(X_3) = 1,6096 - 2,2189X_3 + 4,3809X_3^2.$

Анализ результатов, приведенных на рисунках 3.12-3.14, показывает, что скорость подачи исходного материала оказывает наибольшее влияние на энергоемкость измельчения, а число оборотов режущих ножей, зазор между режущими и противорежущими ножами практически одинаково влияют на нее.

Уравнение регрессии при $V_{ИМ} = 0,08$ м/с имеет вид:

$$\mathcal{E}_{ИЗ} = 3489,25 - 0,0786n_{PH} - 71451,65S_H + 0,11n_{PH}S_H + 0,000017n_{PH}^2 + 373155,6S_H^2. \quad (3.23)$$

С учетом (3.32) построена поверхность отклика при изменении n_{PH} и S_H (рисунок 3.15).

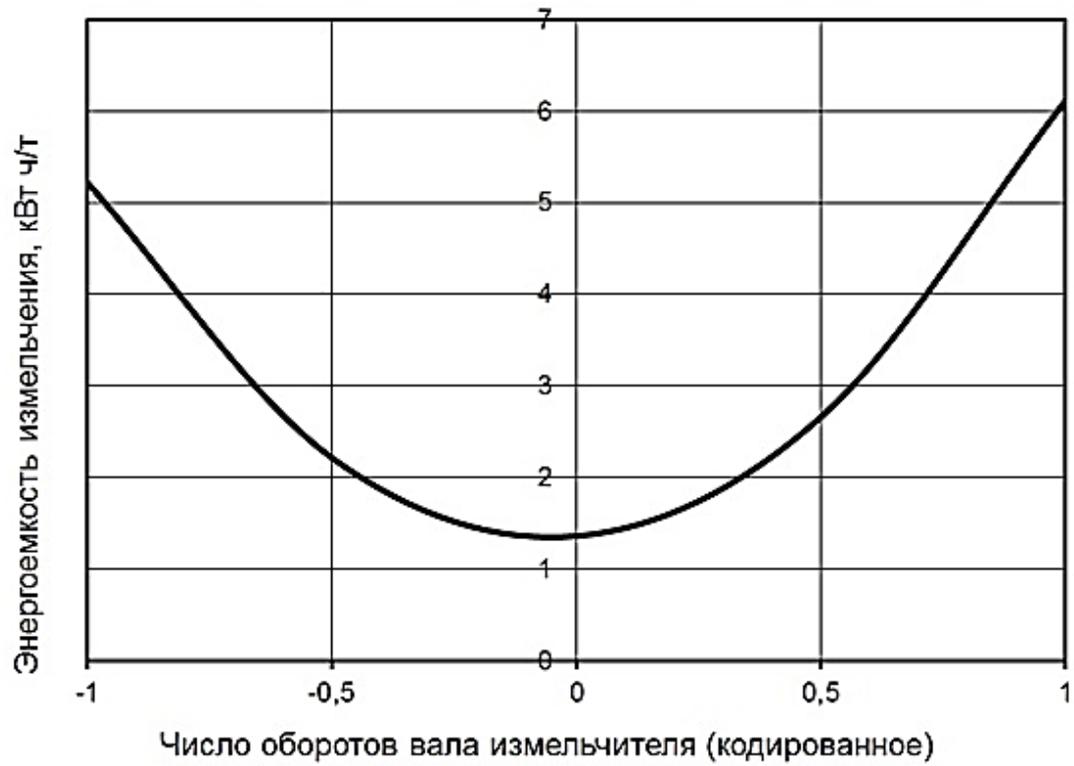


Рисунок 3.12 – Зависимость энергоёмкости измельчения от числа оборотов режущих ножей



Рисунок 3.13 – Зависимость энергоёмкости измельчения от зазора между режущими и противорежущими ножами

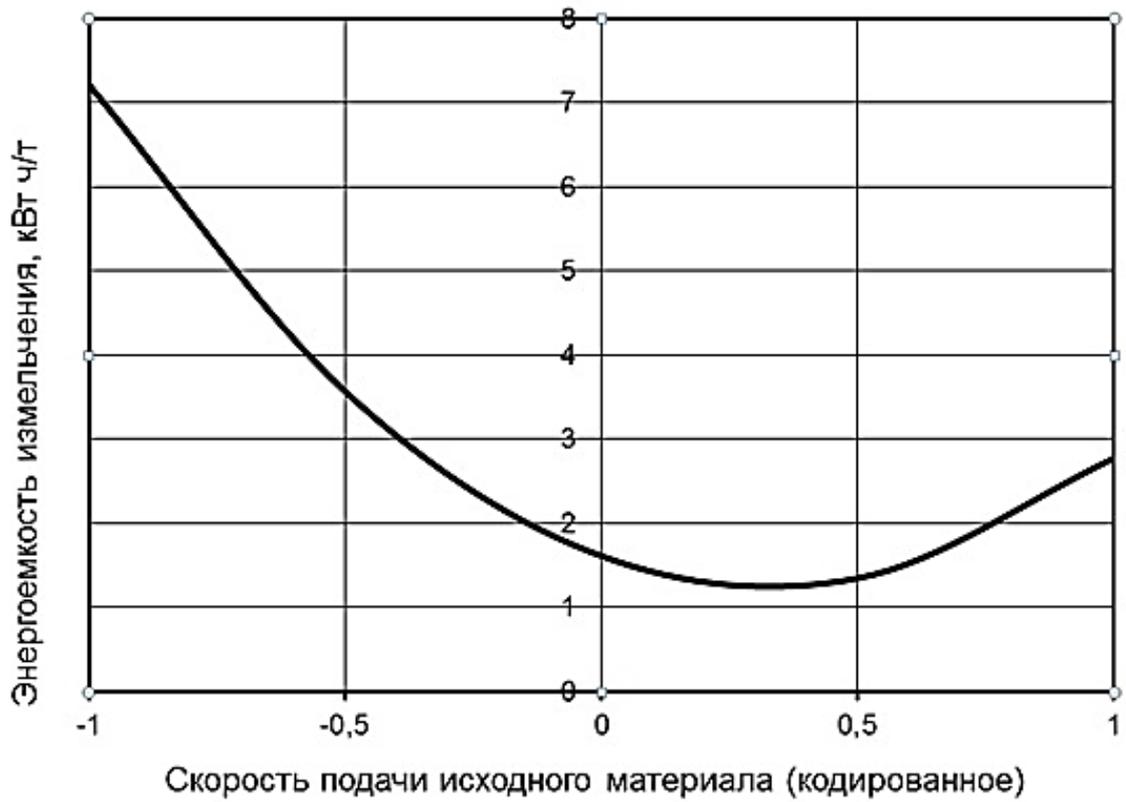


Рисунок 3.14 – Зависимость энергоемкости измельчения от скорости подачи исходного материала

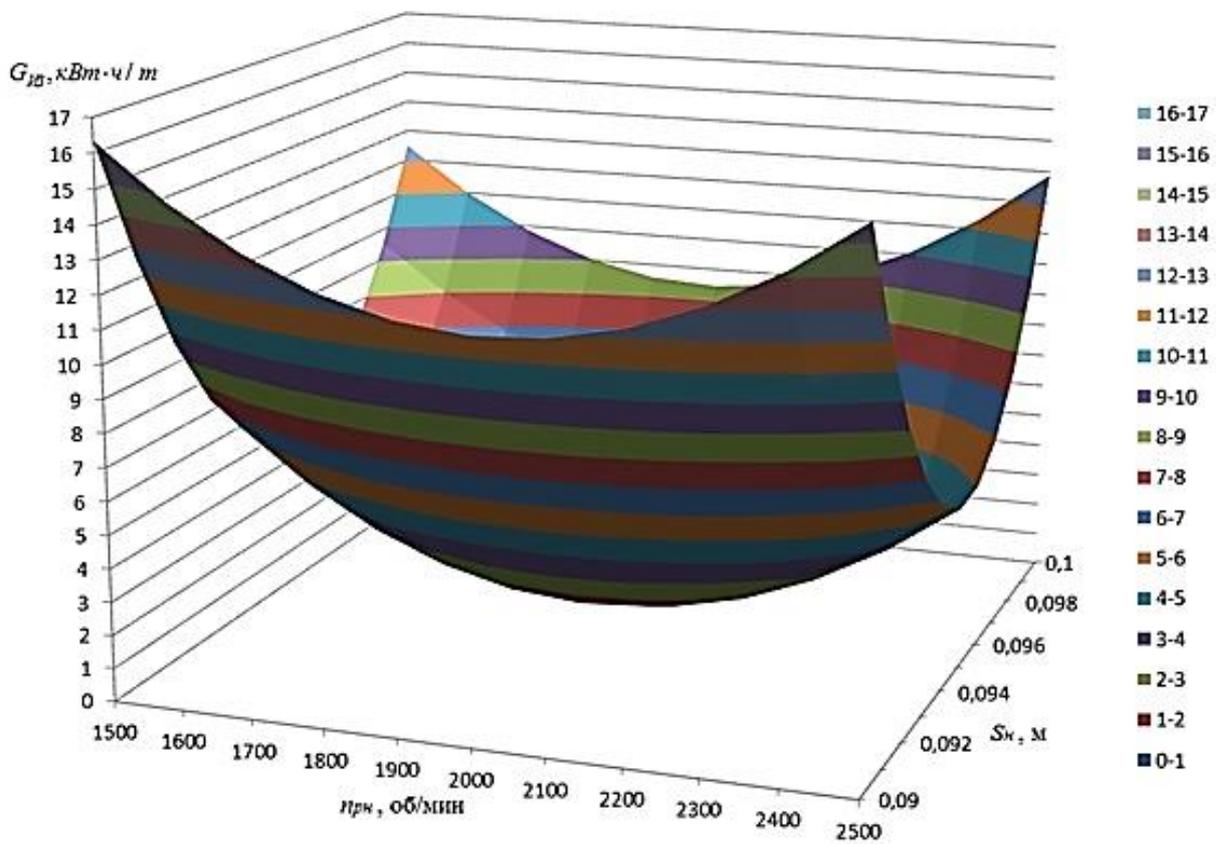


Рисунок 3.15 – Поверхность отклика $f(n_{PH}, S_H)$ при $V_{IM} = 0,08$ м/с

Уравнение регрессии при $S_H = 0,0095$ м следующее:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ИЗ} = & 92,189 - 0,0687n_{PH} - 507,96V_{ИМ} + 0,00712n_{PH}V_{ИМ} + 0,000017n_{PH}^2 + \\ & + 2738,06V_{ИМ}^2. \end{aligned} \quad (3.24)$$

С учетом (3.24) построена поверхность отклика при изменении n_{PH} и $V_{ИМ}$ (рисунок 3.16).

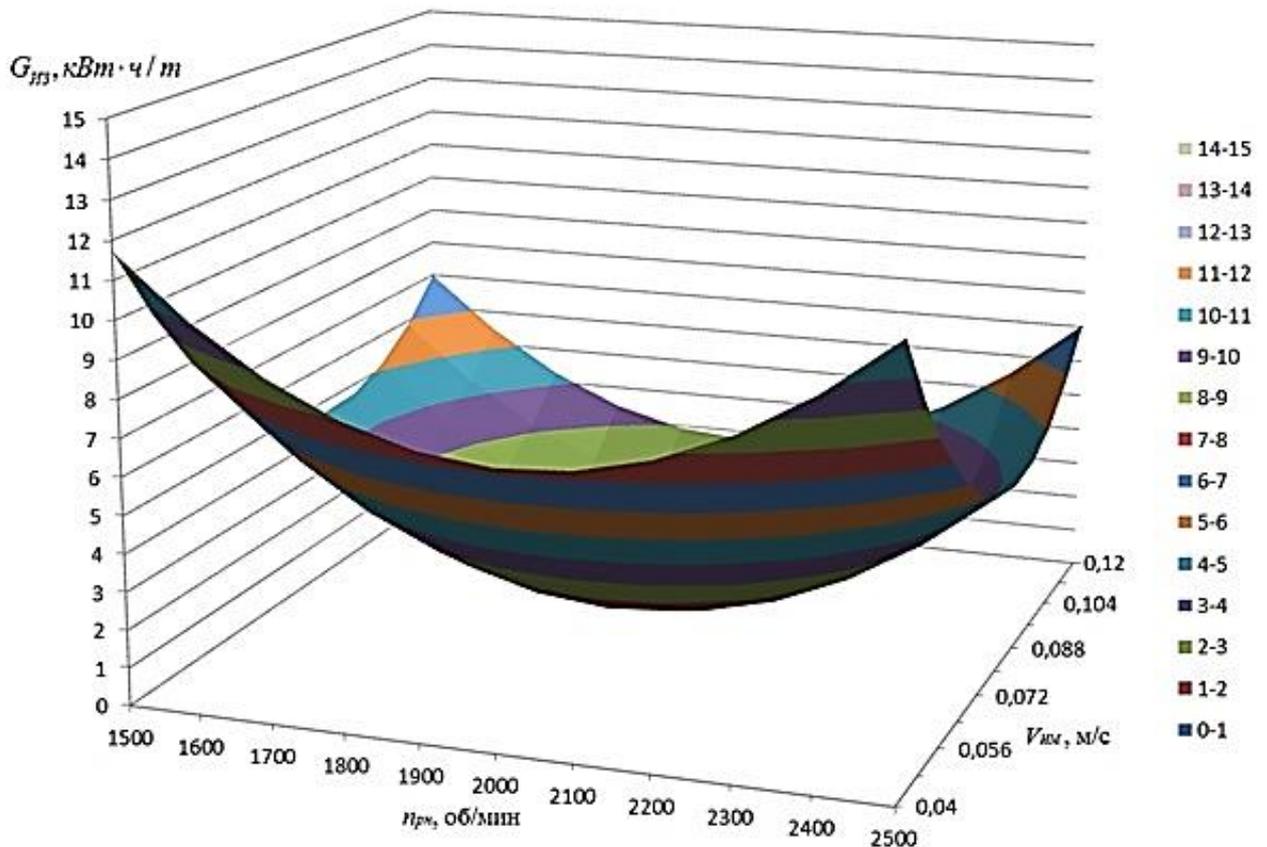


Рисунок 3.16 – Поверхность отклика $f(n_{PH}, V_{ИМ})$ при $S_H = 0,0095$ м

Уравнение регрессии при $n_H = 2000$ мин⁻¹ запишется в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ИЗ} = & 3427,83 - 71293,3S_H - 566,94V_{ИМ} + 770,833S_HV_{ИМ} + 373155,6S_H^2 + \\ & + 2738,06V_{ИМ}^2. \end{aligned} \quad (3.25)$$

С учетом (3.25) построена поверхность отклика при изменении S_H и $V_{ИМ}$ (рисунок 3.17).

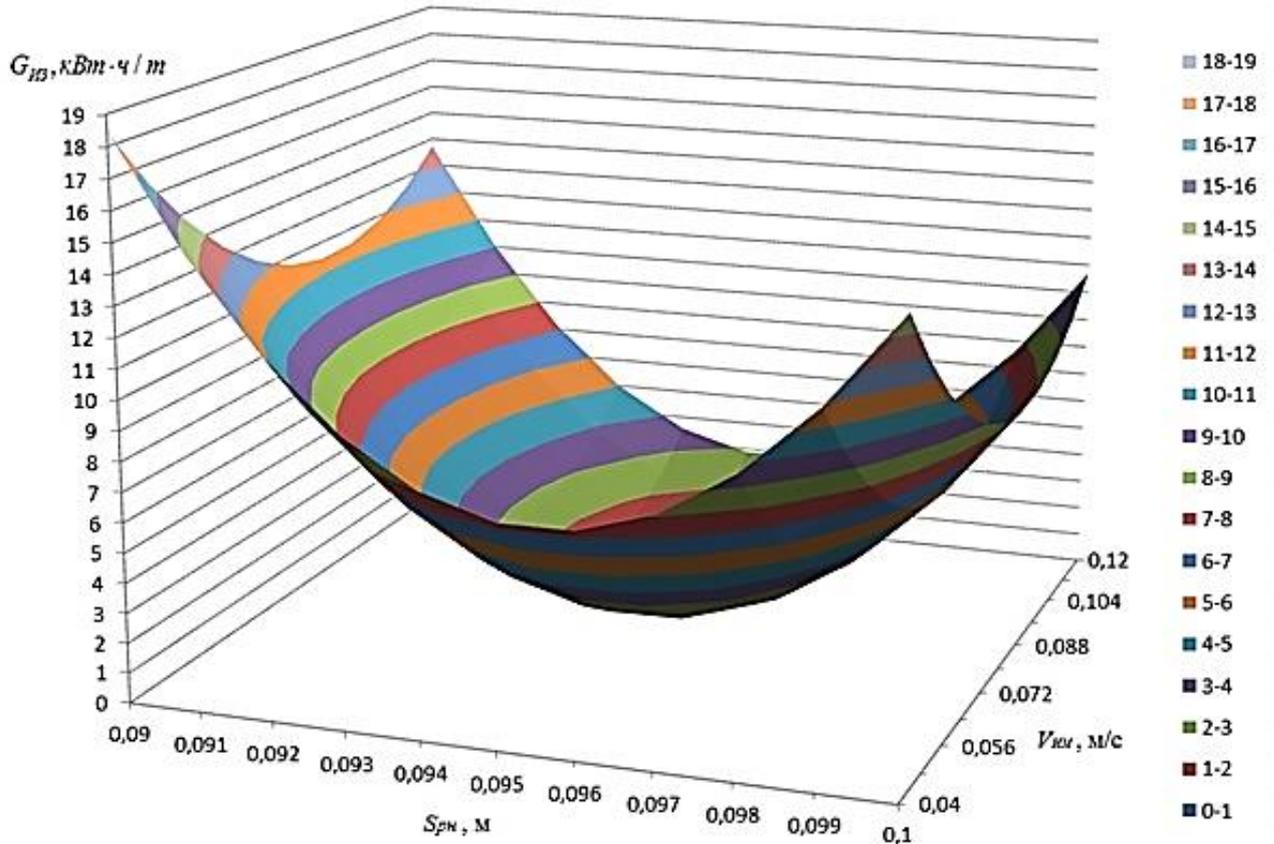


Рисунок 14 – Поверхность отклика $f(S_H, V_{ИМ})$ при $n_H = 2000 \text{ мин}^{-1}$

3.6 Определение механической характеристики механизма привода измельчителя

Нагрузочная диаграмма электропривода рабочих органов измельчителя приведена на рисунке 3.18.

Запуск установки осуществляется на холостом ходу с последующим загрузкой механизма подачи – ленточного транспортера и рабочего органа.

Мощность двигателя измельчителя тратится на мощности: $P_{ИЗМ}$ – мощность измельчения; $P_{ПОД}$ – мощность механизма подачи; $P_{ХХ}$ – мощность холостого хода машины.

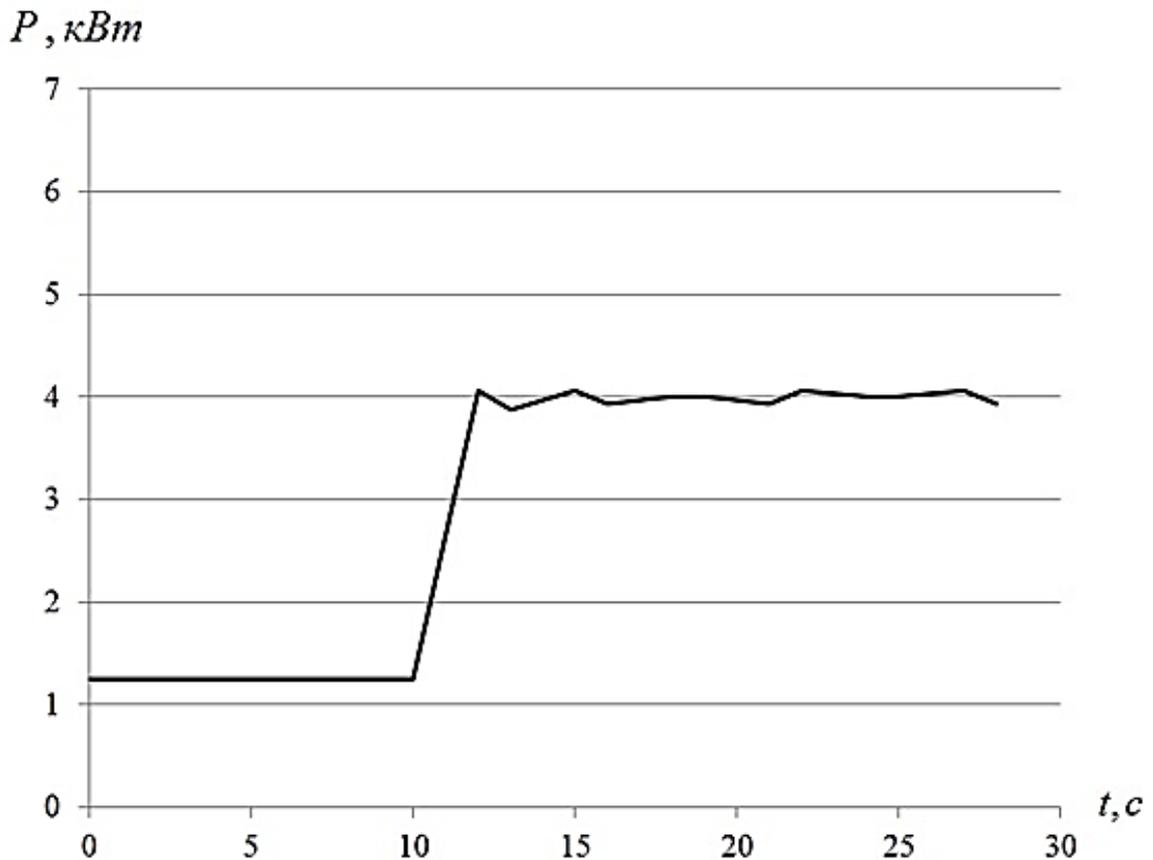


Рисунок 3.18 - Нагрузочная диаграмма измельчителя

Причем соблюдается соотношение: $P_{изм} : P_{под} : P_{хх} = 3 : 1 : 1$.

Расчет эквивалентной мощности проводим для участка полной нагрузки.

Определяем эквивалентный статический момент по формуле:

$$P_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i^2 + P_i P_{i+1} + P_{i+1}^2) \frac{t_i}{3}}{\sum_{i=1}^{n-1} t_i}}. \quad (3.26)$$

Согласно нагрузочной диаграмме, получим, что $P_{ЭКВ} = 3,86$ кВт.

Высокопроизводительным, надежным и экономически выгодным может считаться только такой производственный агрегат, у которого приводной электродвигатель имеет электромеханические свойства, соответствующие

характеристикам и технологическим требованиям рабочей машины. Важнейшими признаками двигателя рабочих машин являются их механические характеристики.

Механические характеристики механизма привода измельчителя описываются эмпирической формулой:

$$M_C = M_0 + (M_{C.H} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^X, \quad (3.27)$$

где M_C – момент сопротивления при угловой скорости ω , Н·м; $M_{C.H}$ – момент сопротивления при угловой скорости ω_H , Н·м; X – показатель степени для измельчителей, характеризующий изменение статического момента при изменении угловой скорости; M_0 – момент сопротивления трения движущихся частиц (не зависит от скорости), Н·м; ω – текущие значения угловой скорости, с⁻¹; ω_H – номинальная угловая скорость рабочего органа, с⁻¹.

Момент сопротивления при номинальной угловой скорости рассчитывается по выражению:

$$M_{C.H} = 9550 \frac{P_{XX}}{n_H}, \quad (3.28)$$

где n_H – номинальная частота вращения рабочего органа, об/мин.

При $P_{XX} = 1,25$ кВт и $n_H = 2000$ об/мин в соответствии с выражением (3.28) получим, что $M_{C.H} = 5,97$ Н·м.

Для измельчителей, которые запускаются в холостую:

$$\frac{M_0}{M_{с.н}} = 0,3. \quad (3.29)$$

Отсюда имеем:

$$M_0 = 0,3M_{с.ном}. \quad (3.30)$$

Таким образом: $M_0 = 1,79$ Н·м.

Номинальная угловая скорость рабочего органа рассчитывается по выражению:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}. \quad (3.31)$$

С учетом того, что $n_H = 2000$ об/мин, получим: $\omega_H = 209$ с⁻¹.

Результаты расчета механической характеристики сведены в таблицу 3.12 (рисунок 3.19).

Таблица 3.12 – Результаты расчета механической характеристики

ω	0	30	60	90	120	150	180	209
M_0	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
$M_{с.н}$	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97
ω_H	209	209	209	209	209	209	209	209
X	2	2	2	2	2	2	2	2
M_c	1,79	1,88	2,14	2,57	3,17	3,94	4,89	5,97

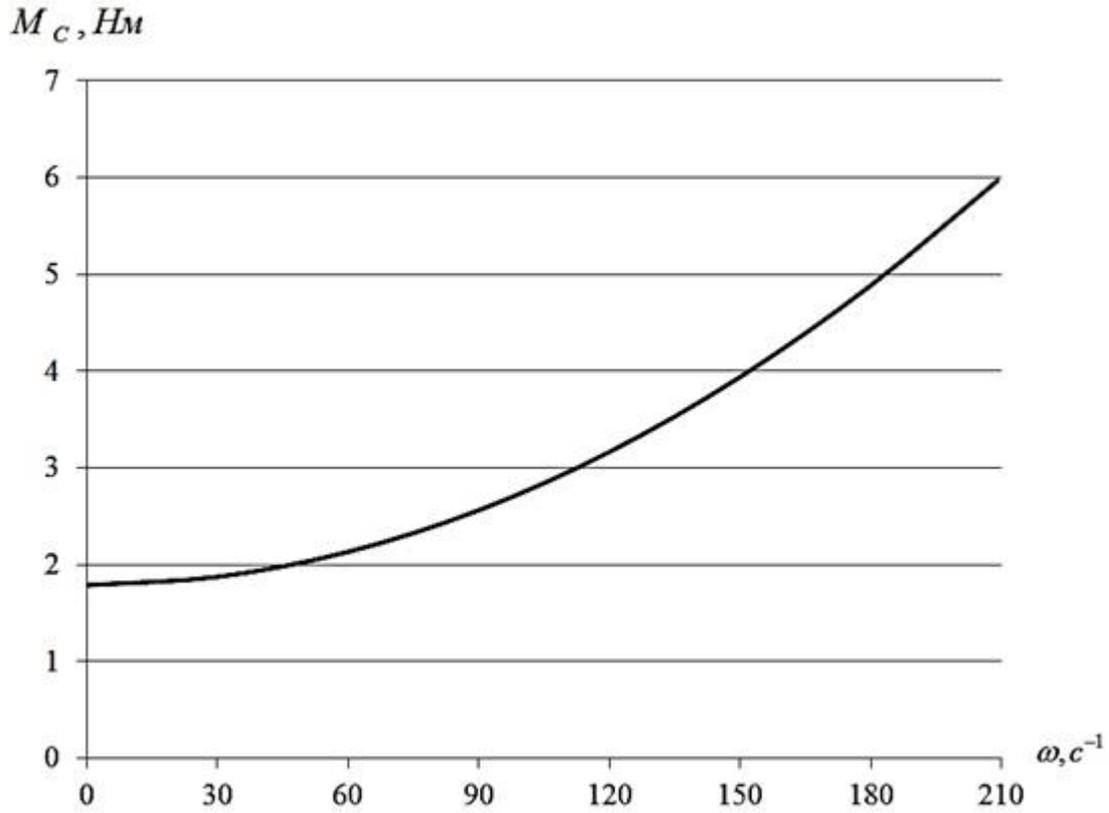


Рисунок 3.19 – Механическая характеристика электропривода измельчителя

Эквивалентная мощность на валу электродвигателя:

$$P_{\mathcal{E}} = \frac{P_{\text{ЭКВ}}}{\eta_0}, \quad (3.32)$$

где η_0 – общий коэффициент полезного действия всех передач.

Общий коэффициент полезного действия разработанного измельчителя $\eta_0 = 0,808$. Тогда $P_{\mathcal{E}} = 4,78$ кВт.

По мощности выбираем электродвигатель по условию:

$$P_H \geq P_{\mathcal{E}}. \quad (3.33)$$

Выбираем предварительно электродвигатель серии АИМ112М4 с такими техническими характеристиками: $P_{H.ДВ} = 5,5$ кВт; $n_{H.ДВ} = 1500$ об/мин; $I_H = 11,5$ А; $k_{II} = 2,3$; $k_{\min} = 1,8$; $k_{\max} = 2,8$; $k_i = 7,0$; $J_P = 0,016$ кг·м².

Выполняем проверочный расчет соблюдения условия пуска:

$$M_{H.ДВ} \geq M_{H.П.} \quad (3.34)$$

Угловая скорость электродвигателя:

$$\omega_{H.ДВ} = \frac{\pi n_{H.ДВ}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}. \quad (3.35)$$

Номинальный момент электродвигателя:

$$M_{H.ДВ} = \frac{P_{H.ДВ}}{\omega_{H.ДВ}} = \frac{5,5}{157} = 0,035 \text{ Н·м}. \quad (3.36)$$

Момент статического сопротивления двигателя, приведенного к валу электродвигателя:

$$M_{CC} = \frac{M_{\max} \omega_H}{\omega_{H.ДВ}} = \frac{0,026 \cdot 209}{157} = 0,035 \text{ Н·м}, \quad (3.37)$$

где

$$M_{\max} = \frac{P_{\max}}{\omega_{H.ДВ}} = \frac{4,06}{157} = 0,026 \text{ Н·м}, \quad (3.38)$$

Номинальный момент при пуске двигателя:

$$M_{H.П} = 1,25 \frac{M_{CC}}{k_{\min} U^2} = 1,25 \frac{0,035}{1,8 \cdot 0,8} = 0,03 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (3.39)$$

где $k_{\min} = 1,8$ – кратность минимального момента электродвигателя; $U = 0 - 0,925$ – напряжение при пуске электродвигателя, для мощных двигателей берется меньшее значение.

Согласно (3.34):

$$M_{H.ДВ} = 0,035 \geq M_{H.П} = 0,03, \quad (3.40)$$

т.е. условие пуска выполняется.

Таким образом, окончательно принимаем электродвигатель серии АИМ112М4: асинхронный трехфазный двигатель серии АИМ общего назначения, с высотой оси вращения 112 мм, длинной станиной, с количеством полюсов – 4, УП – пылезащищенный, У2,5 – климатическое исполнение; степень защиты – IP54; конструктивное исполнение по способу монтажа – IM1081; исполнение по взрывозащите – СС0470 II2GExdIIBT4.

Максимально допустимый приведенный к валу электродвигателя момент инерции рабочего органа:

$$J_{\max} = K K_m P_{H.ДВ}^{\nu} p^{\gamma}, \quad (3.41)$$

где K – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности электродвигателя; K_m – коэффициент, определяющий зависимость статического сопротивления от угловой скорости; p – количество пар полюсов; ν , γ – показатели степени.

Принимаем: $K=0,045$ (для закрытых электродвигателей); $K_m=0,85$ (для электродвигателей с высотой оси вращения до 250 мм); $p=4/2=2$; $\nu=1$; $\gamma=2$. Тогда $J_{\max} = 0,842 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Приведенный к валу электродвигателя момент инерции рабочего органа:

$$J_{\text{п.р.о}} = J_P (F_j - 1), \quad (3.42)$$

где J_P – момент инерции ротора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; F_j – коэффициент инерции.

Принимаем: $J_P=0,016 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $F_j=15$ (для измельчителей). Тогда $J_{\text{п.р.о}} = 0,224 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Видно, что:

$$J_{\max} = 0,842 \geq J_{\text{п.р.о}} = 0,224, \quad (3.43)$$

т.е. условие выполняется.

При неравномерной нагрузке проверяем выбранный электродвигатель на перегрузочную способность:

$$P_{\text{н.дв}} \geq 1,33 \frac{P_{\max}}{k_{\max}}, \quad (3.44)$$

где k_{\max} – кратность максимального момента;

Для выбранного электродвигателя $k_{\max} = 2,8$. Тогда:

$$P_{\text{н.дв}} = 5500 \geq 1,33 \frac{4060}{2,8} = 1928,5.$$

Как видно, условие выполняется.

Активная мощность, потребляемая электродвигателем из сети:

$$P_{A.H} = \frac{P_{H.ДВ} K_3}{\eta_{H.ДВ}}, \quad (3.45)$$

где K_3 – коэффициент загрузки; $\eta_{H.ДВ}$ – номинальное значение КПД электродвигателя.

Для выбранного электродвигателя: $K_3 = 0,8$; $\eta_{H.ДВ} = 0,87$. Тогда:

$$P_{A.H} = \frac{5,5 \cdot 0,8}{0,87} = 5,18 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность, потребляемая электродвигателем:

$$Q_{P.H} = P_{A.H} \operatorname{tg} \varphi_H, \quad (3.46)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_H$ – тангенс угла при номинальном значении $\cos \varphi_H$.

Для выбранного электродвигателя: $\operatorname{tg} \varphi_H = 0,66$ при $\cos \varphi_H = 0,84$. Тогда:

$$Q_{P.H} = 5,18 \cdot 0,66 = 3,42 \text{ квар.}$$

Полная мощность:

$$S_H = \sqrt{P_{A.H}^2 + Q_{P.H}^2} = \sqrt{5,18^2 + 3,42^2} = 6,21 \text{ кВА.} \quad (3.47)$$

3.7 Выводы

1. Экспериментальными исследованиями установлено, что требуемая равномерность потока измельчаемого материала к рабочим органам измельчителя обеспечивается при $n_T = 80-90$ мин⁻¹; максимальная производительность измельчителя 0,7-0,9 т/ч достигается при частоте оборота рабочего органа 2000 мин⁻¹.

2. В результате экспериментальных исследований установлено, что минимальная энергоёмкость процесса измельчения (1,33 кВт·ч/т) обеспечивается при $n_{PH} = 1974$ мин⁻¹, $S_H = 0,095$ м, $V_{IM} = 0,09$ м/с.

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ

Экономическая эффективность использования предлагаемого измельчителя оценена в сравнении с измельчителем грубых кормов ИРР-1 со следующими характеристиками: производительность – до 800 кг/ч; мощность электродвигателя – 25 кВт; стоимость – 340 тыс. руб. Характеристики предлагаемого измельчителя: производительность – 700-900 кг/ч; мощность электродвигателя – 5,5 кВт; стоимость – 130 тыс. руб.

Экономические показатели определяли в соответствии с существующими методиками [46, 58, 70, 75].

Приведенные затраты рассчитывали по зависимости:

$$ПЗ = З_{ЭКС} + E_H K, \quad (4.1)$$

где $Z_{ЭКС}$ – эксплуатационные затраты; E_H – нормативный коэффициент; K – капитальные вложения.

В зависимости (4.1) значение $Z_{ЭКС}$ рассчитано по формуле:

$$Z_{ЭКС} = Z_{ПЛ} + Z_Э + Z_{ТО} + Z_{ПР}, \quad (4.2)$$

где $Z_{ПЛ}$ – заработная плата обслуживающего персонала, тыс. руб.; $Z_Э$ – затраты на электроэнергию, тыс. руб.; $Z_{ТО}$ – затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт, тыс. руб.; $Z_{ПР}$ – прочие затраты, тыс. руб.

Значение $Z_{ПЛ}$ рассчитывается по выражению:

$$Z_{ПЛ} = N_P t_O s_M \eta_D \left(1 + \frac{\eta_0}{100} \right), \quad (4.3)$$

где N_P – количество обслуживающего персонала, чел.; t_O – время, затраченное на обслуживание, мес.; s_M – размер среднемесячной заработной платы обслуживающего персонала, руб./мес.; η_D – коэффициент дополнительной заработной платы, ($\eta_D = 1,1-1,2$); η_0 – отчисления на социальное страхование, % ($\eta_0 = 35,6\%$).

$$Z_{ПЛ} = 1 \cdot 8 \cdot 15000 \cdot 1,2 \left(1 + \frac{35,6}{100} \right) = 195,264 \text{ тыс. руб.}$$

Значения затрат на потребленную электрическую энергию определяли по выражению:

$$Z_{Э} = N_{ЭЛ} \cdot t_{СМ} \cdot D \cdot Ц_{ЭЛ}, \quad (4.4)$$

где $N_{ЭЛ}$ – номинальная мощность электрических двигателей, кВт; $t_{СМ}$ – время работы электрических двигателей в смену, ч; D – время работы машин в году, дн.; $Ц_{ЭЛ}$ – цена электрической энергии, руб./кВт.

Варианты А (новый) и Б (базовый):

Вариант А:

$$Z_{Э} = 5,5 \cdot 6 \cdot 240 \cdot 5,86 = 46,4 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант Б:

$$Z_{Э} = 25 \cdot 6 \cdot 240 \cdot 5,86 = 210,9 \text{ тыс. руб.}$$

Значения $Z_{ТО}$ составят:

$$Z_{TO} = \sum_{i=1}^n K_i \frac{(\alpha_A + \alpha_{ТОиТР})}{100}, \quad (4.5)$$

где K_i – стоимость оборудования, тыс. руб.; α_A – отчисления на амортизацию, % ($\alpha_A = 16,6\%$); $\alpha_{ТОиТР}$ – отчисления на техническое обслуживание и текущий ремонт, % ($\alpha_{ТОиТР} = 14\%$).

Вариант А:

$$Z_{TO} = 130 \cdot \frac{16,6 + 14}{100} = 39,78 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант Б:

$$Z_{TO} = 340 \cdot \frac{16,6 + 14}{100} = 104,04 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, значение $Z_{ЭКС}$:

Вариант А:

$$Z_{ЭКС} = 195,26 + 46,4 + 39,78 = 281,44 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант Б:

$$Z_{ЭКС} = 195,26 + 210,9 + 104,04 = 510,2 \text{ тыс. руб.}$$

Значения прочих прямых затрат по вариантам следующие:

Вариант А:

$$Z_{ПР} = 281,44 \cdot 0,05 = 14,07 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант Б:

$$Z_{ПР} = 510,2 \cdot 0,05 = 25,51 \text{ тыс. руб.}$$

Результаты общего расчета себестоимости конечной продукции сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета себестоимости продукции

Статьи затрат	Варианты	
	новый А	базовый Б
Оплата труда с отчислениями на социальные нужды, тыс.руб.	195,25	195,25
Расходы на содержание оборудования, в т.ч.:		
- амортизацию, техническое обслуживание и ремонт, тыс. руб.	39,78	104,04
- электроэнергию, тыс. руб.	46,4	210,9
Прочие затраты, тыс. руб.	14,07	25,51
Полная себестоимость, тыс. руб.	295,5	535,7

Расчетные значения приведенных затрат по вариантам:

Вариант А:

$$ПЗ_1 = 295,5 + 0,15 \cdot 130 = 315,0 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант Б:

$$ПЗ_2 = 535,7 + 0,15 \cdot 340 = 586,7 \text{ тыс. руб.}$$

Значение годового экономического эффекта рассчитали по формуле:

$$\mathcal{E}_r = ПЗ_2 - ПЗ_1, \quad (4.6)$$

где $ПЗ_1, ПЗ_2$ - приведенные затраты по сравниваемым вариантам А и Б.

$$\mathcal{E}_r = 586,7 - 315,0 = 271,7 \text{ тыс. руб.}$$

Значения удельного расхода энергии W (кВт·ч/т), показывающие полноту использования мощности используемых электрических двигателей определяли по выражению:

$$W = \frac{N}{q_p}, \quad (4.7)$$

где $N_{эл}$ – номинальная мощность электродвигателей, кВт; q_p – удельная производительность, т/ч.

Вариант А:

$$W = \frac{5,5}{0,9} = 6,11 \text{ кВт·ч/т.}$$

Вариант Б:

$$W = \frac{25}{0,8} = 31,25 \text{ кВт·ч/т.}$$

Общую эффективность \mathcal{E} (т/кВт·ч) оценивали по выражению:

$$\mathcal{E} = \frac{q_p}{N}. \quad (4.8)$$

Вариант А:

$$\mathcal{E} = \frac{0,9}{5,5} = 0,16 \text{ т/кВт·ч.}$$

Вариант Б:

$$\mathcal{E} = \frac{0,8}{25} = 0,032 \text{ т/кВт·ч.}$$

Экономический эффект от снижения энергетических затрат по предлагаемому измельчителю определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{сн} = (N_{баз} - N_{предл}) t_{год} Ц_{\mathcal{E}}, \quad (4.9)$$

где $N_{БАЗ}$ - мощность, потребляемая базовым измельчителем ИРР-1, кВт; $N_{ПРЕДЛ}$ - мощность, потребляемая предлагаемым измельчителем, кВт; $t_{ГОД}$ - годовой фонд времени работы оборудования; $C_{Э}$ - цена 1 кВт электроэнергии, руб./кВт.

$$\mathcal{E}_{СН} = (25 - 5,5) \cdot 1500 \cdot 5,86 = 171,41 \text{ тыс. руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ)

1. Анализ конструктивно-технологических особенностей измельчителей грубых стебельных кормов показал, что предлагаемые рынком сельскохозяйственной техники для использования в личных подсобных и крестьянских (фермерских) хозяйствах предназначены в основном для измельчения стеблей злаковых культур. Существующие измельчители толстостебельных грубых кормов отечественного производства имеют большую металлоемкость, достаточно большую энергоемкость процесса измельчения вследствие использования в качестве привода нескольких электродвигателей различной мощности.

2. Разработана конструктивно-технологическая схема измельчителя для крестьянских (фермерских) хозяйств, обеспечивающая эффективное измельчение грубых толстостебельных кормов с минимальными энергетическими затратами (патент РФ №168572 на полезную модель).

3. Получены аналитические зависимости взаимодействия рабочего органа измельчителя с измельчаемым материалом, позволяющие установить: силы, возникающие в процессе резания грубых толстостебельных кормов; работу и мощность, затрачиваемые на измельчение исходного материала; общую мощность, потребляемую измельчителем в процессе работы; производительность измельчителя; степень и энергоемкость измельчения материала.

4. Разработан опытный образец измельчителя грубых толстостебельных кормов, основными рабочими органами которого являются основной и подающий валы с зубьями шириной 0,007 м, длиной 0,04 м, с шагом 0,02 м. Для исключения забивания рабочих органов валы вращаются с разной частотой.

5. В результате проведенных экспериментальных исследований установлены оптимальные значения числа оборотов режущих ножей (1974 об/мин), межосевого расстояния между основным и подающим валами (0,095 м) и скорости подачи исходного материала (0,09 м/с), при которых обеспечивается минимальная

энергоёмкость процесса измельчения (1,33 кВт·ч/т). Производительность измельчителя 0,9-3 т/ч.

6. Использование измельчителя грубых толстостебельных кормов позволяет снизить себестоимость продукции в 1,8 раза. Годовой экономический эффект за счет снижения приведенных затрат составит 271,7 тыс. руб.

Рекомендации производству

Для крестьянских (фермерских) хозяйств предлагается измельчитель грубых толстостебельных культур со следующими техническими характеристиками: производительность – 0,9-3 т/ч; длина резки – 10-50 мм; мощность двигателя – 5,5 кВт; число оборотов: основного вала – 1974 мин⁻¹, подающего вала – 100 мин⁻¹; межосевое расстояние – 0,095 м; скорость подачи исходного материала – 0,09 м/с; масса – 62 кг; обслуживающий персонал – 1 чел.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Предложенные методики, технико-технологические решения могут служить основой к расширению научных исследований и практической реализации устойчивого развития кормопроизводства в условиях крестьянских (фермерских) хозяйств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
2. Алешкин, В. Р. Механизация животноводства / В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
3. Алешкин, В. Г. Измельчитель грубых кормов / В. Г. Алешкин, В. Г. Мохнаткин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 11. – С. 41-42.
4. Алешкин, В. Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов: автореф. дис. ...канд. техн. наук. 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Алешкин Владимир Романович. – Санкт-Петербург-Пушкин, 1995. – 38 с.
5. Apazhev, A. K. Scientific justification of power efficiency of technological process of crushing of forages / A. K. Apazhev, Y. A. Shekikhachev, L. M. Hazhmetov, A. G. Fiapshv, L. Z. Shekikhacheva, Y. S. Napov, Z. L. Hazhmetova, D. T. Gabachiyev // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019». – Vol. 1399. – 2019. – 055002. – DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055002. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/5/055002/pdf>.
6. Бареян, А. Г. Особенности резания лезвием и анализ силового взаимодействия на контакте лезвия / А. Г. Бареян // Вестник, серия «Естественнонаучная». – 2004. № 1(6). – С. 50-58.
7. Башков, А. Ф. Обоснование параметров и совершенствование рабочих органов двухроторного измельчителя грубых кормов открытого типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Башков Александр Федорович: - Рязань, 1985. -17 с.
8. Бец, А. К. Механизация измельчения грубых кормов: метод. указания к лабораторной работе по курсу «Механизация животноводческих ферм» / А. К. Бец. – Барнаул: Алтайский ГАУ, 2005. – 49 с.

9. Брагенец, Н. В. Экспериментальные исследования процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов измельчителем с комбинированными ножами / Н. В. Брагенец, А. А. Вертий // Конструювание, вирабницто га експлуатація сільськогосподарських машин. – Харьков, 2015. – Вип. 45, ч. II. – С.129-132.
10. Бремер, Г. И. Учебное пособие по теории расчета дробильных машин / Г. И. Бремер. – М.: ВСХИЗО, 1970. – 50с.
11. Безик, В. А. Оптимизация режимов работы и характеристик измельчителей грубых кормов на основе моделирования: автореф. дис. ... канд. тех. наук. 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Безик Валерий Александрович: – Балашиха, 1998. – 23 с.
12. Безин, А.С. Измельчение грубых кормов / А.С. Безин, Р.П. Пацер, Е.И. Резник // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985.– № 9. – С. 45-47.
13. Будашов, И.А. Обоснование параметров ротационно-дискового режущего аппарата для резания толстостебельных культур: автореферат дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Будашов Игорь Александрович. – Барнаул, 2013. – 22 с.
14. Будилов, А. В. Обзор мобильных измельчителей-раздатчиков грубых кормов, используемых на фермах / А. В. Будилов // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 2. – С. 38-45.
15. Бурмага, А. В. Повышение эффективности функционирования производственных процессов приготовления и раздачи смесей в системе механизированного кормления крупного рогатого скота: диссертация ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Бурмага Андрей Владимирович. - Благовещенск, 2014. - 352 с.
16. Бурмистрова, М.Ф. Физико-механические свойства сельскохозяйственных растений / М.Ф. Бурмистрова. – М.: Сельхозгиз, 1956. – 343 с.
17. Вертий, А. А. Повышение эффективности измельчения грубых стебельных кормов: автореф. дис. ... канд. тех. наук. 05.20.01– «Технологии и

средства механизации сельского хозяйства» / Вертий Александр Анатольевич. – Воронеж, 2019. – 24 с.

18. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 199 с.

19. Вольф, В. Г. Статистическая обработка опытных данных / В. Г. Вольф. – М.: Колос, 1966. – 255 с.

20. Габачиев, Д.Т. Разработка инновационной технологии и технического средства для производства комбинированных кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов, Ю. А. Шекихачев // Наука и Мир.– 2014.– Т. 1.– № 6 (10).– С. 59-60.

21. Габачиев, Д. Т. Измельчитель грубых кормов для крестьянских и фермерских хозяйств / Д. Т. Габачиев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Новая наука: Современное состояние и пути развития (09 сентября 2015 г., г. Стерлитамак).– Стерлитамак, 2015.– С. 69-72.

22. Габачиев, Д. Т. Анализ рабочих органов, обеспечивающих процесс измельчения резанием / Д. Т. Габачиев, Ю. А. Шекихачев, Л. М. Хажметов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Новая наука: Современное состояние и пути развития (09 сентября 2015 г., г. Стерлитамак).– Стерлитамак, 2015.– С.72-74.

23. Габачиев, Д. Т. Разработка инновационной технологии переработки отходов сельскохозяйственного производства и измельчителя грубых кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов // Материалы V Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные инновационные проекты молодых ученых» (22 октября 2015 г., г. Нальчик).– Нальчик: Издательская типография «Принт Центр», 2015.– С.316-318.

24. Габачиев, Д. Т. Анализ способов и технических средств для измельчения грубых кормов / Д. Т. Габачиев [и др.] // Материалы конференции аспирантов и молодых ученых. – Назрань: Ингушский гос. университет, 2015. – С 15-19.

25. Габачиев, Д. Т. Оптимизация параметров и режимов работы измельчителя кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов, Л. З. Шекихачева // Сборник научных трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты» (04–05 февраля 2021 г.).– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021.– С.51-57.

26. Габачиев, Д. Т. Измельчитель грубых кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов // Материалы VI Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные инновационные проекты молодых ученых» (21-23 октября 2016 г., г. Нальчик).– Нальчик: Издательская типография «Принт Центр», 2016.– С.293-296.

27. Габачиев, Д. Т. Обоснование конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов, Л. З. Шекихачева // АгроЭкоИнфо.– 2017.– № 2 (28).– URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/2/st_207.doc.

28. Габачиев, Д. Т. Математическое моделирование процесса работы измельчителя грубых кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов, Л. З. Шекихачева // АгроЭкоИнфо.– 2017.– № 2 (28).– URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/2/st_219.doc.

29. Габачиев, Д. Т. Оптимизация параметров и режимов работы измельчителя кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов, Л. З. Шекихачева // АгроЭкоИнфо.– 2017.– № 4 (30).– URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_402.doc.

30. Габачиев, Д. Т. Определение механической характеристики рабочего механизма измельчителя / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова.– 2021.– № 3 (33).– С. 105-109.

31. Габачиев, Д. Т. Оптимизация параметров работы измельчителя кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Сельскохозяйственное землепользование и

продовольственная безопасность», посвященной памяти Заслуженному деятелю науки РФ, КБР, Республики Адыгея профессора Б.Х. Фиапшеву (22 марта 2021 г.). – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021. – С.208-211.

32. Габачиев, Д. Т. Экспериментальные исследования процесса работы разработанного измельчителя грубых кормов / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов // Сборник научных трудов по итогам X Международной научно-практической конференции «Реализация приоритетных программ развития АПК», посвященной памяти заслуженного деятеля науки РФ и КБР, профессора Б.Х. Жерукова. (24–26 ноября 2022 г.). – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 309-314.

33. Габачиев, Д. Т. Определение механической характеристики рабочего механизма измельчителя / Д. Т. Габачиев, Л. М. Хажметов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса горных и предгорных территорий», посвященной 105-летию Горского ГАУ (26–27 октября 2023 г.). – Владикавказ: Горский ГАУ, 2023. – С. 259-263.

34. ГОСТ 20915 – 2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытания. – М.: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

35. ГОСТ Р 54783 – 2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 19 с.

36. ГОСТ Р ИСО 6497 – 2011 Корма для животных. Отбор проб. – М.: Стандартинформ, 2012. – 15 с.

37. ГОСТ 12.2.042 – 2013 Система стандартов безопасности труда. Машины и технологическое оборудование для животноводства и кормопроизводства. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 23 с.

38. Горячкин, В. П. Теория соломорезки и силосорезки: собрание сочинений в 3-х томах / В. П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – 484 с.

39. Грачев, Ю. А. Математические методы планирования экспериментов / Ю. А. Грачев. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 199 с.

40. Грицай, Д. И. Разработка технологии и средств механизации приготовления зерностержневой кормосмеси (ЗСКС) в крестьянских (фермерских) хозяйствах: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Грицай Дмитрий Иванович. – Владикавказ, 2007. – 23с.

41. Грицай, Д. И. Приготовление измельченной кукурузной смеси в крестьянских (фермерских) и личных подсобных хозяйствах / Д. И. Грицай, О. Г. Ангилеев // Механизация электрификация сельского хозяйства. – 2007. – №7 – С. 12-13.

42. Демидов, А. Р. Способы измельчения и методы их эффективности / А. Р. Демидов, С. Е. Чирков.– М.: ЦИНТИ СССР, 1969.– С. 5-44.

43. Демин, А. А. Исследование рабочего процесса измельчителя ИРР-1,5 в линии гранулированных кормов / А. А. Демин // Вестник НГИЭИ. – 2012. – №4. – С. 196-203.

44. Демченко, В. Н. Повышение эффективности процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов / В. Н. Демченко, А. А. Вертий // Науковий вісник ТДАТУ. – Луганск: Луганский национальный агроуниверситет, 2012. – Вып. 1, Т.3. – С. 74-78.

45. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351с.

46. Драгайцев, В. И. Методика экономической оценки технологий и машин в сельском хозяйстве / В. И. Драгайцев, Н. М. Морозов.– М.: 2010. – 145 с.

47. Жабко, В. А. Исследование и обоснование основных параметров режущих аппаратов для измельчения волокнистых кормовых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Жабко Витольд Александрович. – Минск, 1979. – 17с.

48. Желиговский, В. А. Экспериментальная теория резания лезвием / В. А. Желиговский // Труды Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства. – М., 1941. – Вып. 9. – С. 25–41.

49. Желиговский, В. А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов / В. А. Желиговский. – Тбилиси: 1960. – 146 с.
50. Журавлев, Б. И. Комплексная механизация животноводческих ферм в Нечерноземной зоне / Б. И. Журавлев. – М.: Россельхозиздат.– 1976.– 335с.
51. Завалишин, Ф. С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф. С. Завалишин, М. Г. Мацнев. – М. : Колос, 1982. – 230 с.
52. Измельчение мясного сырья в звероводстве / Г. И. Малинов, Т. А. Гаврилов [и др.]. – Петрозаводск : ПетрГУ, 2013. – 63 с.
53. Измельчитель стеблей кукурузы. – URL: <https://made-in-china.com>.
54. Инвестиционный паспорт Кабардино-Балкарской Республики. – URL: https://invest-kbr.ru/otrasli/index.php?ELEMENT_ID=2032.
55. Кирпичев, В. Л. Журнал русского химического и физического общества / В. Л. Кирпичев // Часть физическая.– М., 1874.– Т.6, вып. 9.– С. 5-9.
56. Класнер, Г. Г. Конструктивно-режимные параметры измельчителя замоченного зерна сои: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Класнер Георгий Георгиевич. – Краснодар, 2018. – 18 с.
57. Коробко, Н. И. Влияние способа подготовки грубых кормов на процесс жвачки у коров / Н. И. Коробко // Сб. ст. : Корма и кормление сельскохозяйственных животных. – Киев, 1964. – Вып. I. – С. 25-30.
58. Краюхин, Г. А. Экономическая эффективность изобретений и рационализаторских предложений / Г. А. Краюхин. – Л.: Лениздат, 1983. – 129. с.
59. Кулаковский, И. В. Машины и оборудование для приготовления кормов: справочник специалиста / И. В. Кулаковский [и др.] – М.: Россельхозиздат 1987. – Ч. I. – 285 с.
60. Кулик, М. Ф. Грубые корма и их использование / М. Ф. Кулик. – Киев: Урожай, 1978. – 119 с.
61. Кукта, Г. М. Технология переработки и приготовления кормов / Г. М. Кукта. – М.: Колос, 1973. – 240 с.

62. Кукта, Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г. М. Кукта. – М.: Агропромиздат, 1987 – 303 с.
63. Левинсон, Л. Б. Дробление и грохочение полезных ископаемых / Л. Б. Левинсон. – М.-Л.: Гостопиздат, 1940. – 58-72.
64. Леонтьев, П. И. Технологическое оборудование кормоцехов / П. И. Леонтьев [и др.]. – М.: Колос, 1984. – 157 с.,
65. Лучанский, А. С. Прогрессивная технология заготовки и приготовления кормов для сельскохозяйственных животных / А. С. Лучанский // Сб. статей: Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин для механизации животноводческих хозяйств. – Ростов н/Д, 1974. – с. 68-74.
66. Матусевич, Б. Е. Машины и оборудование ферм для откорма крупного рогатого скота / Б. Е. Матусевич.– М.: Россельхозиздат, 1983.– 63 с.
67. Мельников, С. В. Классификация молотковых кормодробилок. / С. В. Мельников // Записки ЛСХИ. – Л.: 1972. – Т. 199. – С. 15-19.
68. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Л.: Колос, 1978. – 560 с.
69. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников.– Л.: Колос, 1980.– 168 с.
70. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений, и рационализаторских предложений. – М.: Колос, 1980. – 112 с.
71. Михайлов, В. А. Результаты экспериментальных исследований дробилки грубых кормов открытого типа / В. А. Михайлов, А. В. Смоленский // Сборник трудов ВНИПТИМЭСХ: Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства, 1977. – Вып. 28. – С. 61-64.
72. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализа данных / Д. К. Монтгомери – Л.: 1980. – 384 с.
73. Морозов, Н. М. Направления развития инновационной техники для приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота / Н. М.

Морозов, И. И. Хусаинов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2012. – №1 (5). – С.80-88.

74. Морозов, Н. М. Программа и методика проведения исследований по разработке системы машин для комплексной механизации животноводства и птицеводства на 1986-1995гг. и уточнение прогноза развития техники на период до 2000г / Н.М. Морозов [и др.] – М.: ВИЭСХ, 1981. – 234 с.

75. Морозов, Н. М. Экономическая эффективность комплексной механизации животноводства/ Н. М. Морозов. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 224 с.

76. Мохнаткин, В. Г. Теоретические и экспериментальные исследования бункерных измельчителей стебельных кормов с молотковым ротором: монография / В. Г. Мохнаткин [и др.]. – Киров: Вятская ГСХА. – 2011. – 130 с.

77. Мохнаткин, В. Г. Повышение эффективности функционирования бункерного измельчителя-раздатчика стебельных кормов путем оптимизации молоткового ротора: монография / В.Г. Мохнаткин [и др.]. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. – 116 с.

78. Мохнаткин, В. Г. Разработка и исследование мобильного измельчителя-раздатчика стебельных: монография / В. Г. Мохнаткин, О. П. Матушкин [и др.] – Киров: Вятская ГСХА, 2009. – 124 с.

79. Мохнаткин, В. Г. Совершенствование конструкций и оптимизация параметров измельчителей грубых кормов для поточных линий кормоперерабатывающих предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.20.01 / Мохнаткин Владимир Григорьевич. – Киров, 1986. – 25с.

80. Осипов, Я. А. Совершенствование способа измельчения грубых кормов / Я. А. Осипов, Н. С. Кузнецов // Механизация и электрификация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. трудов / Дальневосточный ГАУ, ФМСХ. – Благовещенск: ДальГАУ. – 2014. – Вып. 21. – С. 70-73.

81. Оськин, С. В. Автоматизированный электропривод: учебное пособие / С.В. Оськин. – М: СХИ, 2014. – 346 с.

82. ОСТ 70. 19. 2–74 Машины и оборудование для приготовления кормов. Программа и методы испытаний. М.: 1975. – 54 с.

83. Пат. 45226 Российская Федерация А01F 29/00. Малогабаритный измельчитель кормов / Грицай Д. И., Ангилеев О. Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Ставропольский государственный аграрный университет. № 200413104/22; заявл. 13.10.2004; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13.

84. Пат. 2289907 Российская Федерация. МПК А01F29/08. Измельчитель грубых кормов / В. К. Скоркин, Ю.А. Иванов [и др.]; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии). № 2005122781/12; заявл. 18.07.2005; опубл. 27.12.2006, Бюл. 36.

85. Пат. 1831255 СССР. МПК А01F29/02, В02С18/22. Малогабаритный измельчитель-смеситель сельскохозяйственных продуктов / В. И. Шаповалов, В.И. Краснов; №4955595/15; заявл. 16.05.91; опубл. 30.07.93, Бюл. 28.

86. Пат. 2222175 Российская Федерация. МПК А01F29/00 Измельчитель грубых кормов / Г. Г. Маслов, В.Е. Артемов [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кубанский государственный аграрный университет; №2002115618/12; заявл.11.06.2002; опубл. 27.01.2004, Бюл №3.

87. Пат. 2473391 Российская Федерация. МПК А01F29/02, В02С18/26. Измельчитель грубых кормов / Р. С. Аипов, Я.Д. Осипов [и др.]; заявитель и патентообладатель Р.С. Аипов, Я.Д. Осипов [и др.]; заявл. 11.07.2011; опубл. 27.01.13, Бюл. №3.

88. Пат. 2457665 Российская Федерация. МПК А01F29/02. В02С18/06. Рабочий элемент измельчителя кормов / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кубанский государственный

аграрный университет; №2010154332/13; заявл. 29.12.2010; опубл. 10.08.2012, Бюл №22.

89. Пат. 168572 Российская Федерация. МПК В02С4/02. Измельчитель грубых кормов / Д.Т. Габачиев, А.К. Апажев, Л.М. Хажметов [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»; №2016118869; заявл. 16.05.2016; опубл. 09.02.2017, Бюл. №4.

90. Разработка и внедрение комплекса технологий и технических средств возделывания сельскохозяйственных культур в системе органического земледелия с использованием инновационных биологических средств защиты, методов мелиорации и экологизации. – URL: <https://apknet.ru/razrabotka-i-vnedrenie-kompleksa-texnologij-i-texnicheskix-sredstv-vozdelyvaniya-selskoxozyajstvennyx-kultur-v-sisteme-organicheskogo-zemledeliya-s-ispolzovaniem-innovacionnyx-biologicheskix-sredstv-z/>.

91. Рамзаев, А. В. Параметры и режимы работы шнекового измельчителя – транспортера прессованных грубых кормов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Рамзаев Александр Владимирович. – зерноград, 2008. – 25с.

92. Ребиндер, П. А. Разрушение и обработка твердых тел / П. А. Ребиндер. – Сорена, 1940. – № 12. – С. 25-36.

93. Резник, Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 311с.

94. Резник, Е. И. Механизация обработки грубых кормов на животноводческих фермах: обзорная информация / Е. И. Резник – М.: ВНИИТЭИСХ, 1982. – 72 с.

95. Резник, Е. И. Оценка различных технологий измельчения грубых кормов / Н. Е. Резник // Кормопроизводство. –1983. – №10. – С. 19-20.

96. Резник, Е. И. Машины и оборудование для обработки грубых кормов/ Е. И. Резник. – М.:Россельхозиздат, 1984. – 80 с.

97. Резник, Е. И. Оценка качества измельченных грубых кормов /Е. И. Резник, С. В. Рыжов //Техника в сельском хозяйстве.– 1986.– №4.– С. 28-29.
98. Резник, Е. И. Техника для малогабаритных кормоцехов / Е. И. Резник // Тракторы и сельхоз. машины. – 1989. – №10. – С. 5-9.
99. Резник, Е. И. Машины и оборудование для малых и семейных ферм КРС. / Е. И. Резник. – Минск.: Бел. научн. центр информ. и мфкетинга, 1991. – 68 с.
100. Резник, Е. И. Пути совершенствования измельчающих аппаратов для стебельчатых кормов / Е. И. Резник, В. К. Скоркин // Труды 2-ой Международной конференции «Проблемы механизации и автоматизации животноводства» (ВНИИМЖ). – Подольск, 1999. – Ч.1. – С.146-161.
101. Резник, Е. И. Энергоемкость процесса измельчения стебельчатых кормов / Е. И. Резник, В. К. Скоркин // Труды 2-ой Международной научно-технической конференции (ВИЭСХ). – М.: 2000. – Ч.2. – С.9-15.
102. Рощин, П. М. Эксплуатация технологического оборудования животноводческих ферм и комплексов / П. М. Рощин [и др.]. – Под ред. С. В. Мельникова. – М.: Колос, 1980. – 287 с.
103. Рыжов, С. В. Механизация переработки соломы на корм /С. В. Рыжов. – М.: Колос, 1983. – 235 с.
104. Рыжов, С. В. Техника для малых ферм / С. В. Рыжов // Механизация и электрификация сельского хозяйства.– 1988.– №11.– С. 23-26.
105. Савиных, П. А. Исследование рабочего процесса молотковой дробилки зерна с ротором-вентилятором / П.А. Савиных [и др.] //Аграрная наука Северо-Востока. – Киров: Северо-Восточный научно-методический центр Россельхозакадемии, 2013. – № 1. – С. 54-59.
106. Сайтов, В. Е. Машины для измельчения и раздачи грубых кормов и подстилки / В. Е. Сайтов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 4. – С. 112-113;

107. Сарбатова, Н. Ю. Совершенствование процесса приготовления и раздачи грубых кормов рулонной заготовки: автореф. дис. ... кан. тех. наук: 05.20.01 / Сарбатова Наталья Юрьевна. – Нальчик, 2006. – 24с.

108. Социально-экономическое положение Кабардино-Балкарской Республики.– URL: <https://dspace.ncfu.ru/bitstream/20.500.12258/21262/1>.

109. Стяжкин, В. И. Новые технологии приготовления и раздачи кормов [Крупный рогатый скот] / В. И. Стяжкин [и др.] // Сб. науч. тр. / Всерос. НИПТИМЖ. – 2002. – Т.11. – Ч.1. – С.179-190.

110. Сулима, М. А. О влиянии скорости резания на энергоемкость процесса измельчения стебельчатых кормов / М. А. Сулима // Труды Курского сельскохозяйственного института. – Курск: 1967. – Т. 17. – С. 37–43.

111. Сысуев, В. А. Рациональные параметры двухступенчатой дробилки для малых ферм / В. А. Сысуев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2001. – №5. – С. 26-29.

112. Тихонов, Н. И. Определение силы резания ножом / Н. И. Тихонов //Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 8 – С. 24.

113. Трубилин, Е. И. Горизонтальный дисковый рабочий орган / Е.И. Трубилин [и др.] // Сельский механизатор, 2014. - №11. – С. 22-23.

114. Туманова, М. И. Совершенствование измельчающих рабочих органов машин по приготовлению и раздаче кормов / М. И. Туманова // Международ. научный журнал «Молодой ученый». – 2016. – №1(105.1) – С.279-282.

115. Туманова, М. И. Параметры измельчителя стебельных кормов с дисковым рабочим органом для малых ферм КРС: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Туманова Марина Ивановна. – Краснодар, 2020. – 23 с.

116. Хажметов, Л. М. Конструктивные особенности измельчителей грубых кормов / Л. М. Хажметов, Д. Т. Габачиев // Материалы IV Межвузовской научно-практической конференции сотрудников, студентов и магистрантов аграрных вузов СКФО (29-30 апреля 2015 г.).– Нальчик, 2015.– С.151-155.

117. Хажметов, Л. М. Анализ способов измельчения грубых кормов / Л. М. Хажметов, Д. Т. Габачиев // Материалы V межвузовской научно-практической

конференции сотрудников и обучающихся аграрных вузов СКФО «Инновации в агропромышленном комплексе» (22–23 апреля 2016 г.).– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2016.– С.187-191.

118. Хажметов, Л. М. Результаты исследований конструктивно-режимных параметров измельчителя грубых кормов / Л. М. Хажметов, Д. Т. Габачиев // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова.– 2020.– № 4 (30).– С. 79-86.

119. Хажметов, Л. М. Измельчитель для приготовления комбинированных кормов / Л. М. Хажметов, Д. Т. Габачиев // Сборник научных статей XII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК», в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016» (30 марта-01 апреля 2016 г.).– 2016.– С. 114-118.

120. Хажметов, Л. М. Инновационная технология и техническое средство для измельчения грубых кормов / Л. М. Хажметов, Ю. А. Шекихачев, Д. Т. Габачиев // Каталог инновационных разработок Кабардино-Балкарского ГАУ.– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2016.– С. 19-20.

121. Хажметов, Л. М. Разработка измельчителя грубых кормов для крестьянских и фермерских хозяйств / Л. М. Хажметов, Д.Т. Габачиев, З.Л. Хажметова // Сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса России», посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ю. М. Хаширова (25–26 апреля 2019 г.).– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2019.– С.227-229.

122. Хажметов, Л. М. Исследование процесса работы измельчителя грубых кормов / Л. М. Хажметов, Д. Т. Габачиев, З. Л. Хажметова // Сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса России», посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ю.М. Хаширова (25–26 апреля 2019 г.).– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2019.– С.229-234.

123. Хажметов, Л. М. Определение механической характеристики привода рабочих механизмов измельчителя грубых кормов / Л. М. Хажметов, Д. Т. Габачиев, И. Т. Машекуашев // Сборник научных трудов IX Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Энергосбережение и энергоэффективность: проблемы и решения», посвященной 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора Х. У. Бугова (22–23 декабря 2020 г.).– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2020.– С.162-168.

124. Хажметов, Л. М. Конструктивные особенности измельчителей грубых толстостебельных кормов / Л.М. Хажметов, Д. Т. Габачиев, К. Л. Хажметов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Энергетическая, экологическая и продовольственная безопасность: актуальные вопросы, достижения и инновации» (22–23 декабря 2022 г.).– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022.– С. 162-166.

125. Федоренко, И. Я. Ресурсосберегающие технологии и оборудование в животноводстве: учебное пособие / И. Я. Федоренко, В. В. Садов. – СПб: «Лань», 2012. – 296 с.

126. Федоренко, И. Я. Техника и технологии в животноводстве учебное пособие /И.Я. Федоренко, В.В. Садов. – Барнаул: АГАУ, 2014.– 214 с.

127. Фролов, В. Ю. Классификация кормораздатчиков / В. Ю. Фролов, М. И. Туманова // Техника и оборудование для села. – 2013. – №7 – С. 18-19.

128. Фролов, В. Ю. Ресурсосберегающие технологии приготовления и раздачи кормов на животноводческих фермах малых форм хозяйствования / В. Ю. Фролов [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2013.– №3.– С.140.

129. Фролов, В. Ю. Анализ процесса резания длинностебельных кормов сегментом с криволинейной режущей кромкой / В. Ю. Фролов, Д. П. Сысоев, А. Х. Журтов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – №103. – С. 840-854.

130. Фролов, В. Ю. Классификация технических средств для приготовления и раздачи кормовых смесей на малых фермах КРС / В. Ю. Фролов, И. Е. Припоров,

Д. П. Сысоев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №114 (10). – С. 1-13.

131. Хлыстунов, В. Ф. Смешивание кормов в порционных аппаратах с вертикальным коническим шнеком / В. Ф. Хлыстунов, М. А. Тищенко, С. В. Брагинец // Техника в сельском хозяйстве. – 2004. – №3. – С. 13–14.

132. Черкасов, А. Н. Проблемы механизации малых ферм / А. Н. Черкасов, Л. П. Кормановский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – №7. – С. 28-29.

133. Чернявский, И. М. Проектирование механических передач: учебно-справочное пособие для вузов / И. М. Чернявский [и др.]. – М: Машиностроение, 1984. – 558 с.

134. Шабельник, Б. П. Математическая обработка результатов экспериментального исследования / Б. П. Шабельник. – Харьков, 1988. – 14 с.

135. Школьников, П. Н. Повышение эффективности функционирования технологической линии приготовления и раздачи кормов на малых фермах крупного рогатого скота: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Школьников Павел Николаевич; [Дальневост. гос. аграр. ун-т]. – Благовещенск, 2016. – 170 с.

136. Шашков, В. Б. Прикладной регрессионный анализ (многофакторная регрессия): Учебное пособие. / В. Б. Шашков. - Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.

137. Apazhev, A. K. Scientific justification of power efficiency of technological process of crushing of forages / A. K. Apazhev , Y. A. Shekikhachev, L. M. Hazhmetov, D. T. Gabachiyev [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (APITECH-2019)».– Vol. 1399.– 2019.

138. Sysoev, D. P. The evaluation of efficiency of using technologies for preparation and distribution of fodder at small farms / V. Y. Frolov, D. P. Sysoev // Research J. of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – №7 (1). – P. 1264–1271.

139. Sysoev, D. P. Experimental Aspects of Crushing of The Stalk Forage with a Disc ConeShaped Working Organ with Combined Segments / V. Y. Frolov, D. P. Sysoev, M. I. Tumanova, N. J. Sarbatova // Research J. of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2018. – №9 (3). – P. 958-967.

140. Sysoev D. P. Substantiation of design and standard parameters of chopper of soaked grain of leguminous plants (as an example of the soya grain) / V.Y. Frolov, G. G. Klasner, D.P. Sysoev // Periódico tchê química. – 2019. – № 31. – P. 258-267.

141. Van der Maas, J. Mobile Futterungssysteme / J. Van der Maas, R. Jakob, H. Ammann // FAT – Tanikon. – 1998. –№ 522. – P. 1-14.

142. Liepe, M. Paddewellenmischer als einfache Mechanischemittel zum kontinuierlichen Mischen / M. Liepe // NiUepe. Agrartechnik. – 1990. – Ks 12. – S. 323-325.

143. Fehnlauer, M. Hinweise zur Entwicklung und zum Betrieb von Futtennischen / M. Fehnlauer, M. Albert // Agrartechnik. – № 9. – S. 398-400.

144. Roesicke, E. Milchviefutterung heite leistungs- und kostenorientiert / E. Roesicke. – Bonn. : aid, 2000. – 62 S.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 168572

ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ГРУБЫХ КОРМОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова" (ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Апажев Аслан Каральбиевич (RU), Хажметов Луан Мухажевич (RU), Шекихачев Юрий Ахметханович (RU), Габачиев Джамалдин Тамирланович (RU), Фоменко Сергей Александрович (RU), Ашибоков Умар Асланович (RU), Хажметов Катемир Луанович (RU)*

Заявка № 2016118869

Приоритет полезной модели 16 мая 2016 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 09 февраля 2017 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 16 мая 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **168 572** ⁽¹³⁾ **U1**(51) МПК
B02C 4/02 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2016118869, 16.05.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.05.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.05.2016

(45) Опубликовано: 09.02.2017 Бюл. № 4

Адрес для переписки:

360030, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в, ФГБОУ ВО
Кабардино-Балкарский ГАУ, НИС, Дударовой
Ф.Т.

(72) Автор(ы):

Апажев Аслан Каральбиевич (RU),
Хажметов Луан Мухажевич (RU),
Шекихачев Юрий Ахметханович (RU),
Габачиев Джамалдин Тамирланович (RU),
Фоменко Сергей Александрович (RU),
Ашибокоев Умар Асланович (RU),
Хажметов Катемир Луанович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Кабардино-Балкарский
государственный аграрный университет им.
В.М. Кокова" (ФГБОУ ВО Кабардино-
Балкарский ГАУ) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2473391 C1, 27.01.2013. RU
2220567 C1, 10.01.2004. UA 52760 U,
10.09.2010. UA 21288 A, 04.11.1997.(54) **ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ГРУБЫХ КОРМОВ**(57) **Формула полезной модели**

1. Измельчитель грубых кормов, содержащий раму со стойками, мотор, механизм привода, два измельчительных барабана, подающий вал с циркуляционными дисками, ленточный транспортер с механизмами натяжения, отличающийся тем, что измельчительные барабаны изготовлены из цельных металлических прутков, в поперечных плоскостях которых выточены шесть зубьев толщиной 2 мм, высотой 7 мм и длиной 20 мм, расположенные относительно друг друга под углом 60° и распределенные по всей длине цилиндрической поверхности прутков с шагом 7 мм, при этом барабаны установлены параллельно относительно друг друга с возможностью вхождения зубьев в межзубовое их пространство и вращения вокруг своих горизонтальных осей, при этом первый барабан приподнят относительно второго на 60 мм и вращается против часовой стрелки с частотой 2000 мин⁻¹, а второй по часовой стрелке с частотой 100 мин⁻¹.

2. Измельчитель по п. 1, отличающийся тем, что сверху измельчительных барабанов установлен подающий вал с жестко закрепленными циркуляционными дисками, которые расположены по всей длине вала с шагом 20 мм с возможностью вращения вокруг



ФГБОУ ВПО «КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В.М. Кокова»

Диплом

НАГРАЖДАЕТСЯ

*участник второго этапа
Всероссийского конкурса на лучшую научную работу
среди студентов, аспирантов и молодых ученых
высших учебных заведений Министерства сельского
хозяйства Российской Федерации
в номинации
«Технические науки»*

**ГАБАЧИЕВ ДЖАМАЛДИН
ТАМИРЛАНОВИЧ**
за занятое 2 место

Ректор



А.К. Апажев

9 апреля 2015г.
Пальчик



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЮТСЯ

*коллектив Кабардино-Балкарского государственного аграрного
университета им. В.М. Кокова*

Фиापшев А.Г., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой
«Энергообеспечение предприятий»

Хажметов Л.М., д.т.н., профессор кафедры «Техническая механика и физика»

Хапов Ю.С., ст. преподаватель кафедры «Энергообеспечение предприятий»

Габачиев Д.Т., аспирант кафедры «Техническая механика и физика»

за представленную разработку

«Измельчитель грубых кормов»

на 17-й Международной выставке «Агроуниверсал – 2015»

Директор ГУП СК
выставочно-маркетингового центра



А.Н. Петенев

*Молодежный бизнес-форум
«Точка Роста. Место силы»*

ДИПЛОМ

Награждается **Габачиев Джамалдин Тамерланович**

за разработку: «Измельчитель кормов»

Руководитель форума **Васильченко Е.В.**





СЕРТИФИКАТ

ВЫДАН

Табачкиеву Джамалмадыну Тамерлановичу

**участнику выставки инновационных
проектов молодых ученых Северного Кавказа,
посвященной Дню Российской науки,
в Кабардино-Балкарском государственном
университете им. Х.М. Бербекова**

**Зам. председателя
Российского союза
молодых ученых**

С.Ю. Хаширова



6 февраля 2015 года, г. Нальчик



FEDERAL SERVICE FOR
INTELLECTUAL PROPERTY
(ROSPATENT)



KABARDINO-BALKARIAN
STATE UNIVERSITY



NATIONAL SEMINAR

CERTIFICATE

We hereby certify that

Gabachiyev Dzhamaldin

Participated in the

*NATIONAL SEMINAR ON INTELLECTUAL PROPERTY POLICIES IN
UNIVERSITIES AND RESEARCH INSTITUTIONS*

Organized by

the World Intellectual Property Organization (WIPO),
the Federal Service for Intellectual Property (ROSPATENT), and
the Kabardino-Balkarian State University (KBSU)

Nalchik, the Russian Federation

November 24 and 25, 2015

Yury Altudov
Rector of the Kabardino-
Balkarian state university

Michal Svantner
Director
WIPO Office in
the Russian Federation

МОЛОДЕЖНЫЙ ФОРУМ

АГРОПОКОЛЕНИЕ

ДЕНЬ МОЛОДЕЖИ НА ВЫСТАВКЕ **AGROSALON**
 07 ОКТЯБРЯ 2016 ГОДА, «МВЦ КРОКУС ЭКСПО», МОСКВА, РОССИЯ

ДИПЛОМ

УЧАСТНИКА КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ
 СТУДЕНЧЕСКИХ РАБОТ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЗАЦИИ

Габачиев Джамалдин Тамирланович

ФГБОУ ВО «Кабардино–Балкарский государственный
 аграрный университет им. В.М. Кокова»

ТЕМА РАБОТЫ

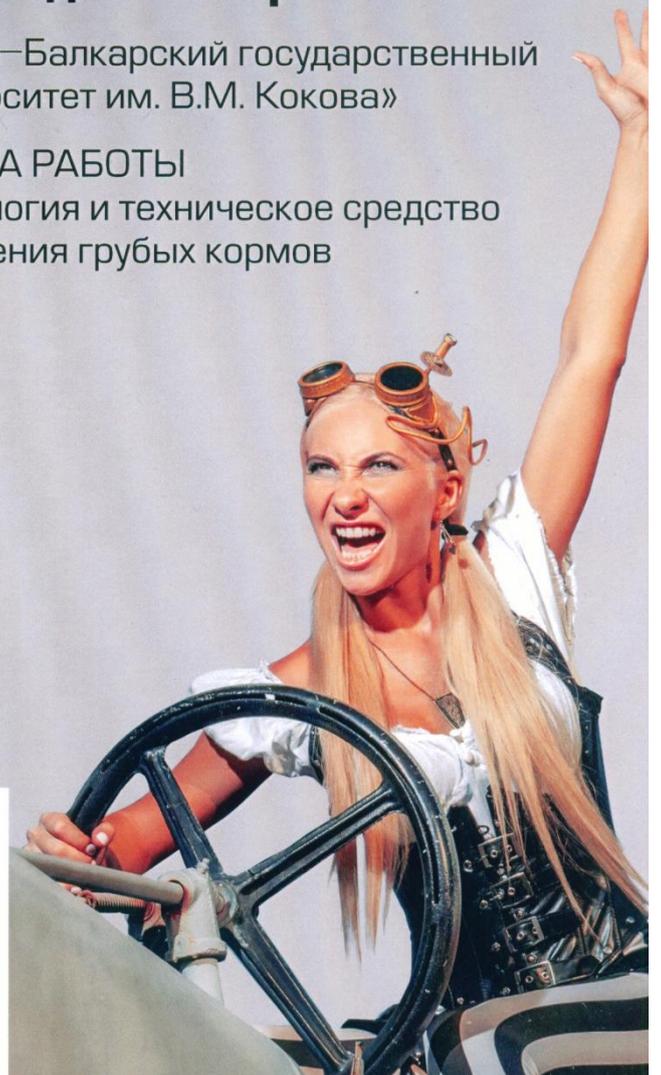
Инновационная технология и техническое средство
 для измельчения грубых кормов



ЕЛИЗАРОВА А.В.
 ДИРЕКТОР ВЫСТАВКИ
 АГРОСАЛОН

ИНФОРМАЦИОННЫЙ
 ПАРТНЕР:

СВЕТИЧ
 www.SveticH.info
 АгроМедиаХолдинг



Nalchik
 ВЫСТАВКА - РЫНАРКА
 НАУЧНЫХ И
 ИННОВАЦИОННЫХ
 ПРОЕКТОВ
 В КАДРАХ МАГАРСКОГО ДУ 2016

Министерство сельского хозяйства
 Российской Федерации

Федеральное государственное
 бюджетное образовательное
 учреждение высшего образования
 «Кабardino-Балкарский
 государственный аграрный
 университет им. В.М. Козлова»

08-12 ФЕВРАЛЯ 2016

НЕДЕЛЯ НАУКИ

ДИПЛОМ

2 степени

В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШАЯ ИННОВАЦИЯ В АПК»
 за научную разработку

«Измельчитель грубых кормов»
 (Хажметов А.М., Габачиев Д.Т.)

Ректор

Алажев А.К.

СЕРТИФИКАТ

Лауреата Третьей степени

в номинации

«Лучшая бизнес-идея»

ВЫДАН

Табачинову Дж. Те.

**Лауреату X Выставки инновационных проектов
молодых ученых Северного Кавказа,**

посвященной Дню Российской науки,
в Кабардино-Балкарском государственном
университете им. Х.М. Бербекова

**Зам. председателя
Российского союза
молодых ученых**



С.Ю. Хаширова

08 февраля 2016 года, г. Нальчик

УТВЕРЖДАЮ

Глава

крестьянского (фермерского) хозяйства

«Апеков Алим Нарикович»,
с.п. Анзорей, Лескенский район, КБР

А.Н. Апеков

« 22 » 04 2025 г.

**АКТ**

**использования результатов научно-исследовательских,
опытно- конструкторских и технологических работ**

Настоящий акт составлен в том, что в период с 2024 по 2025 гг. в крестьянском (фермерском) хозяйстве «Апеков Алим Нарикович», расположенном в с.п. Анзорей Лескенского района Кабардино-Балкарской Республики, использован измельчитель грубых толстостебельных кормов, разработанный в ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ соискателем кафедры «Техническая механика и физика» Д.Т. Габачиевым под научным руководством д.т.н., профессора Ю.А. Шекихачева.

Основными рабочими органами измельчителя являются два параллельных вала: основной и подающий, на цилиндрической поверхности которых по всей длине выточены шесть зубьев шириной 0,007 м и длиной 0,04 м, расположенные под углом 60° относительно друг друга и распределенные по всей длине цилиндрической поверхности валов с шагом 0,02 м, входящие в зацепление друг с другом с зазором 0,003 м, при этом основной вал с режущими ножами вращается с частотой 2000-2011 мин⁻¹ по часовой стрелке, а подающий вал с противорежущими ножами с частотой 100 мин⁻¹ против часовой стрелки.

Использование измельчителя грубых толстостебельных кормов выявило следующее:

- забивание рабочих органов измельчителя отсутствует;
- качественные показатели измельчения соответствуют зоотехническим требованиям;
- годовой экономический эффект за счет снижения приведенных затрат составил 271,7 тыс. руб.

Профессор кафедры «Техническая механика и физика», д-р техн. наук

Ю.А. Шекихачев

Соискатель кафедры «Техническая механика и физика»

Д.Т. Габачиев

УТВЕРЖДАЮ

Глава

крестьянского (фермерского) хозяйства

«Инжижиков Заурби Муаедович»,

с.п. Аргудан, Лесекнский район, КБР



З.М. Инжижиков

2024 г.

АКТ

производственных испытаний измельчителя грубых толстостебельных кормов

Настоящий акт составлен в том, что в течение 2024 г. в крестьянском (фермерском) хозяйстве «Инжижиков Заурби Муаедович», расположенном в с.п. Аргудан Лескенского района Кабардино-Балкарской Республики, были проведены производственные испытания измельчителя грубых толстостебельных кормов, разработанного в ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ соискателем кафедры «Техническая механика и физика» Д.Т. Габачиевым под научным руководством д.т.н., профессора Ю.А. Шекихачева.

В результате производственных испытаний установлено, что производительность измельчителя при измельчении стеблей и стержней кукурузы составила 0,8-0,9 т/ч, при измельчении сена или соломы – 2-3 т/ч. Длина резки соответствовала зоотехническим требованиям.

К(Ф)Х «Инжижиков Заурби Муаедович» принял к использованию результаты, полученные при проведении научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по теме «Параметры и режимы работы измельчителя грубых толстостебельных кормов для крестьянских (фермерских) хозяйств».

Профессор кафедры «Техническая механика и физика», д-р техн. наук

Ю.А. Шекихачев

Соискатель кафедры «Техническая механика и физика»

Д.Т. Габачиев