

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ИМПЕРАТОРА ПЕТРА I

На правах рукописи



ВЕРТИЙ Александр Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук В.А. Гулевский

Воронеж – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ.....	12
1.1. Требования, предъявляемые к измельчителям грубых стебельчатых кормов.....	12
1.2. Анализ механико-технологических свойств грубых и стебельчатых кормов	14
1.3. Анализ существующих конструкций измельчающих аппаратов.....	21
1.4. Анализ существующих теоретических исследований процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов	30
Выводы	42
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ.....	44
2.1. Обоснование конструктивно-технологической схемы нового измельчения грубых стебельчатых кормов.....	44
2.2. Теоретическое обоснование производительности измельчителя.....	49
2.3. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение.....	61
Выводы	71
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА	73
3.1. Программа экспериментальных исследований.....	73
3.2. Экспериментальная установка.....	74
3.3. Методика исследования механико-технологических свойств измельчаемых кормов.....	77
3.4. Методика исследования производительности измельчителя...	80

3.5.	Методика исследования энергетики процесса измельчения и степени измельчения кормов.....	82
3.6.	Результаты экспериментальных исследований.....	84
3.6.1.	Результаты исследования механико-технологических свойств.....	84
3.6.2.	Результаты проведения однофакторных экспериментальных исследований производительности измельчителя.....	89
3.6.3.	Результаты проведения однофакторных экспериментальных исследований энергетики процесса измельчения.....	92
3.6.4.	Результаты исследования качества измельчения стебельчатых кормов.....	94
	Выводы	99
4	ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	101
4.1.	Методика проведения и обработки результатов многофакторного эксперимента.....	101
4.2.	Результаты исследования технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов методом планирования многофакторного эксперимента.....	104
4.3.	Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса измельчения грубых стебельчатых кормов.....	111
4.4.	Методика инженерного расчета параметров рабочих органов нового измельчителя грубых стебельчатых кормов и рекомендации по его эффективному использованию	112
	Выводы	120
5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	

ПРИМЕНЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ.....	123
5.1. Расчет экономической эффективности применения измельчителя стебельчатых кормов.....	123
5.2. Рекомендации по использованию измельчителя стебельчатых кормов в производстве.....	126
Выводы.....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Решение задачи продовольственной безопасности возможно только при наличии хорошо развитой отрасли животноводства, что требует постоянного совершенствования технических средств и повышения их уровня эффективности.

Важнейшим направлением животноводства является скотоводство, в частности, выращивание крупного рогатого скота (КРС) и мелкого рогатого скота (МРС). Эффективное скотоводство невозможно без применения современных средств механизации производства, в том числе и кормопроизводства.

Основными компонентами кормовых смесей для КРС являются грубые стебельчатые корма, перевариваемость которых в значительной мере зависит от качества подготовки к скармливанию. В процессе подготовки к скармливанию важное место занимает измельчение, поскольку именно измельчение является наиболее энергоемкой операцией.

Для измельчения грубых кормов промышленность выпускает различные машины и кормоприготовительные агрегаты. Однако большинство из них не обеспечивает регламентированной зоотехническими требованиями степени измельчения, и обладает весьма большой энергоемкостью процесса, а машины материалоемкие и габаритные. Кроме того, многие измельчители неудобны в эксплуатации и недостаточно надежны.

Низкая универсальность большинства существующих измельчителей не позволяет широко использовать их при измельчении разнообразных грубых кормов, многие из которых обладают прочным стеблем (например, кукуруза, сахарное сорго, сорго-суданковый гибрид и т.д.).

Существенным недостатком измельчителей является высокая стоимость, что делает невозможным использование целого ряда машин в личных подсобных и фермерских хозяйствах. Поэтому разработка измельчителя, который бы по производительности, энергоёмкости процесса и

качеству работы подходил бы для ферм с различным поголовьем является весьма актуальной задачей, требующей научного подхода и тщательного обоснования.

Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы агроинженерного факультета «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», утвержденной ученым советом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (№ 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Значительный вклад в исследование процессов измельчения стебельчатых кормов в сельскохозяйственном производстве внесли многие российские и зарубежные ученые: Н.В. Алдошин, В.Р. Алешкин, В.П. Горячкин, Н.И. Есепчук, В.А. Желиговский, Ю.А. Иванов, Н.Е. Резник, Ю.В. Саенко, С.В. Мельников, Л.П. Крамаренко Г.М. Кукта, С.И. Назаров, И.И. Ревенко, В.Д. Роговой, В.И. Шаповалов, Ф.Д. Грязнов, Г.С. Ялпачик, В.С. Хмелевский, В.В. Братишко, С.Ф. Вольвак и многие другие.

Основой всех исследований рабочих органов измельчителей и силосоуборочных комбайнов явились труды основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина, создавшего теоретические основы для расчета большинства типов машин сельскохозяйственного назначения.

Для измельчения грубых стебельчатых кормов в настоящее время промышленность выпускает большое количество измельчителей, которые обладают определенными конструктивно-технологическими отличиями.

Необходимость разработки новых конструкций измельчителей обусловлена стремлением снизить энергоемкость процесса измельчения для использования измельчителей в небольших фермерских хозяйствах и личных подворьях.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является повышение эффективности процесса измельчения грубых стебельчатых

кормов путем разработки конструкции и обоснования основных параметров измельчителя, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– на основании анализа существующей теории измельчения и изучения конструктивно-технологических параметров современных измельчителей выявить основные пути совершенствования технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов, определить наиболее перспективную конструкцию измельчителя и направления ее развития;

– предложить конструктивно-технологическую схему эффективного измельчителя и разработать новые математические модели для определения производительности и затрат мощности на измельчение, учитывающие эффект расщепления отсеченных частиц стебля на части при одновременном ударном воздействии на стебли и их скользящем резании шарнирно подвешенными комбинированными ножами;

– провести экспериментальные исследования и выявить наиболее рациональные конструктивно-технологические параметры измельчителя и режимы его работы. Дать оценку построенным математическим моделям, учитывающим эффект расщепления отсеченных частиц стебля на части при одновременном ударном воздействии на стебли и их скользящем резании шарнирно подвешенными комбинированными ножами, доказать их адекватность;

– испытать в производственных условиях экспериментальный образец измельчителя грубых стебельчатых кормов и выполнить оценку эффективности его применения в производстве.

Объект исследования – технологический процесс измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого одновременно

обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами.

Предмет исследования – установление закономерности технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого обеспечивает ударное воздействие на стебель и скользящее резание.

Научная новизна:

– обоснованы конструктивно-технологические параметры измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами, с учетом энергетических и качественных показателей технологического процесса измельчения;

– установлены аналитические зависимости для определения производительности измельчителя грубых стебельчатых кормов, учитывающие эффект расщепления осекаемых частиц стебля на куски при измельчении;

– получена аналитическая зависимость, определяющая затраты мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов, учитывающая неоднородную структуру внутреннего строения стебля;

– предложена методика инженерного расчета параметров рабочих органов измельчителя грубых стебельчатых кормов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в получении аналитических зависимостей для определения производительности измельчителя грубых стебельчатых кормов с учетом эффекта расщепления осекаемых частиц стебля на куски при измельчении; затрат мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов с учетом неоднородной структуры внутреннего строения стебля, которые дополняют теорию сельскохозяйственных машин.

Практическая значимость работы заключается в разработке эффективного измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами; обосновании оптимальных конструктивно-технологических параметров нового измельчителя грубых стебельчатых кормов. Новизна технических решений, реализованных в новом измельчителе грубых стебельчатых кормов, подтверждена патентом Украины на полезную модель № 69756 (приложение Б).

Методология и методы исследования. Теоретические исследования основаны на системном анализе взаимодействия рабочих органов измельчителя и слоя грубых стебельчатых кормов. Использовалась общая теория резания и основные положения математического анализа и теоретической механики. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с самостоятельно разработанными и известными методиками в лабораторных условиях на разработанной автором экспериментальной установке с использованием современных методов и оборудования для регистрации полученных данных, а также методов планирования одно- и многофакторного эксперимента и статистической обработки результатов исследования на персональном компьютере.

Положения, выносимые на защиту:

– конструктивно-технологические параметры измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган, которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами, позволяющие повысить эффективность технологического процесса измельчения;

– аналитические зависимости для определения производительности измельчителя грубых стебельчатых кормов, позволяющие оценить эффективность работы измельчителя при расщеплении осекаемых частиц стебля на куски;

– аналитическая зависимость, определяющая затраты мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов, позволяющая установить параметры измельчителя, обеспечивающие минимальные энергозатраты;

– методика инженерного расчета параметров рабочих органов измельчителя грубых стебельчатых кормов, позволяющая проектировать измельчители.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты исследований получены с применением апробированных теоретических положений, обработкой аналитических зависимостей на компьютере с использованием прикладных математических программ, путем проведения эксперимента по методу планирования факторных экспериментов и статистической обработки экспериментальных данных. Достоверность теоретических положений подтверждается достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований (отклонения 5...7 %).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях Луганского национального аграрного университета (2010–2014 годы), ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (2017–2019 годы), на международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Роль аграрной науки в развитии АПК РФ» (г. Воронеж, 2017 г.), на XXI международной научно-производственной конференции «Проблемы и решения современной аграрной экономики» (п. Майский, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2017 г.) на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке» (п. Майский, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018 г.).

Результаты исследования внедрены на предприятии ЧСП «Колос» Луганской Народной Республики и используются в учебном процессе ГОУ ВО Луганский национальный аграрный университет, что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад соискателя. Основные исследования по теме диссертационной работы выполнены соискателем лично, в частности:

– проанализированы основные пути повышения эффективности технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов, систематизирована научная информация по созданию нового измельчителя и усовершенствована существующая классификация рабочих органов измельчителей грубых стебельчатых кормов;

– разработана конструктивно-технологическая схема нового измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами;

– обоснованы рациональные и оптимальные конструктивно-технологические параметры нового измельчителя грубых стебельчатых кормов и установлены новые закономерности влияния данных параметров на эффективность выполнения процесса измельчения;

– экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований и определены рациональные и оптимальные значения основных конструктивно-технологических параметров нового измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами;

– разработаны рекомендации по эффективному использованию разработанного измельчителя грубых стебельчатых кормов в производстве.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 12 статей, в том числе пять статей – в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, получен патент Украины на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 134 наименований, и пяти приложений. Общий объем диссертации – 158 страниц, работа содержит 54 рисунка, 21 таблицу.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ

1.1. Требования, предъявляемые к грубым стебельчатым кормам

Новые измельчители грубых и стебельчатых кормов конструктивно должны соответствовать системе стандартов безопасности труда «Машины и технологическое оборудование для животноводства и кормопроизводства. Общие требования безопасности» ГОСТ 12.2.042-91.

К грубым кормам относят: сено, солому и мякину. Они отличаются высоким содержанием клетчатки (от 19 до 45%) [58].

Сено приготавливают из естественных и сеяных трав, а также из травосмесей. Оно является одним из основных кормов для крупного рогатого скота, овец и лошадей в стойловый период. Высококачественное сено является источником протеина, клетчатки, сахаров, минеральных веществ, витамина Д, витаминов группы В и каротина [29, 30, 58, 117]. Хорошее качество сена обеспечивается при просушке трав в поле до влажности 30-35% с последующим прессованием его в тюки и досушиванием методом активного вентилирования [1, 2, 5, 6, 13, 116]. На качество сена влияют ботанический состав трав, фаза их вегетации при скашивании, способ уборки и хранения. Содержание влаги в сене должно быть более 17% [58, 117]. В зависимости от ботанического состава и условий произрастания сено подразделяется на следующие виды: сеяное бобовое; сеяное злаковое; сеяное бобово-злаковое; естественных кормовых угодий (злаковые, бобовые и пр.) [58, 88].

Питательность соломы зависит от вида и сорта растений, времени и способов уборки и других факторов. Более предпочтительной в кормлении животных является солома зернобобовых и яровых злаковых культур. Озимая солома (ржаная и пшеничная) имеет более низкую питательность из-за большого содержания клетчатки (от 36 до 42%) [29, 30, 58, 117].

Солома содержит 3-4% протеина, 1-2% жира, 4-6% минеральных солей, 1-3 мг/кг каротина; в ней мало кальция, фосфора, натрия [29, 30, 58, 117]. Переваримость питательных веществ соломы у жвачных животных – 40-50%, у лошадей – 20-30% [58]. Соломой частично заменяют сено и скармливают ее в сочетании с силосом и другими сочными кормами [58].

Сочные и грубые корма объединяют в группу объемистых кормов. Несмотря на их невысокую питательность, в отличие от концентратов объемистые корма наиболее полно обеспечивают потребности жвачных животных в полноценном питании [58].

К грубым стебельчатым кормам относят сухие стебли кукурузы, сорго и т.д. В рационе животных в зимний период корма этих видов могут составлять 25-30% [29, 30, 46, 58, 88, 117, 124]. Подготовка грубых стебельчатых кормов к скармливанию состоит в измельчении, что повышает поедаемость и улучшает технологические свойства. Измельчение – наиболее простой способ подготовки грубых стебельчатых кормов к скармливанию. Оно способствует повышению поедаемости кормов и облегчает работу органов пищеварения животных. Измельчают данные корма в специальных измельчителях до следующих размеров [30, 51, 56, 60, 121] (таблица 1.1):

Таблица 1.1 – Размер частиц измельченных грубых стебельчатых кормов

Вид корма	Размер частиц измельченного корма, мм	
	КРС	МРС
Сено, солома	30-50	20-30
Зеленые стебли кукурузы	30-50	10-20

В качестве грубого корма используют стержни кукурузных початков, которые содержат 0,35-0,37 кормовых ед. и 13-15 г. переваримого протеина в 1 кг корма [51, 56, 60, 101, 121]. Используют стержни кукурузных початков в качестве грубого корма при кормлении и откормке КРС. Их скармливают в размолотом виде в смеси с другими кормами, а также в

составе гранулированных или брикетируемых кормов. Размеры частиц при этом должны соответствовать размерам, представленным в таблице 1.1.

Измельчители должны эффективно измельчать как сено и солому, так и сухие стебли таких растений как кукуруза, сорго и т.д.

Важным является повышение уровня унификации машин, сокращение их типажа, разработка и производство универсальных измельчителей, способных одинаково эффективно измельчать различные виды грубых стебельчатых кормов, значительно отличающихся по механико-технологическим свойствам.

Разработка новых высокоэффективных измельчителей грубых стебельчатых кормов требует знаний о механико-технологических свойствах измельчаемого материала.

1.2. Анализ механико-технологических свойств грубых стебельчатых кормов

Анализ направлен на определение основных механико-технологических свойств грубых стебельчатых кормов, оказывающих наиболее существенное влияние на эффективность процесса измельчения.

Взаимодействие рабочих органов измельчителя с технологическим материалом, энергоемкость, материалоемкость и качество измельчения в большой степени зависит от следующих свойств: структуры и влажности корма, его первоначальных размеров, объемной массы (плотности), коэффициентов внутреннего и внешнего трения, угла естественного откоса сопротивления стеблей измельчению, загрязнения посторонними предметами и другое. Основные механико-технологические свойства грубых стебельчатых кормов представлены в таблицах 1.2-1.4 [13, 22, 62, 65, 71, 76, 95, 97, 101, 112, 116].

Таблица 1.2 – Механико-технологические свойства грубых стебельчатых кормов

Вид корма	Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Угол естественного откоса, град.
Сено (рассыпное)	15-17	60-85	50-60
Солома (рассыпная)	15-17	45-50	
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	78-08	300-350	53-55
Кукурузный силос (рассыпной)	72-80	600-750	45-53
Травяной сенаж (рассыпной)	50-55	300-350	45-55

Размерные характеристики сечки соломы, получаемой в различных промышленных измельчителях, приведены в таблице 1.3 [5, 36, 81, 89, 92, 112, 122].

Таблица 1.3 – Фракционный состав измельченной соломы

Марка измельчителя	Влажность соломы	Количество частиц, %, размеров					Продольное дробление стеблей, %
		до 10 мм	до 30 мм	до 50 мм	до 100 мм	100 и более мм	
Измельчитель ИСН-3,5А	10,0	10,6	12,2	12,6	29,0	35,6	61,0
Измельчитель ИГК-30Б	13,1	18,7	44,7	23,4	8,4	4,8	90,0
Соломорезка РСС-6Б	10,0	15,2	41,3	26,2	13,0	5,3	70,0
Дробилка ИРТ-10	16,1	31,9	46,8	10,5	7,8	3,0	92,0
Дробилка ДК-4	14,0	26,5	55,0	11,0	5,5	2,0	94,0
Дробилка ДК-1	13,4	23,0	38,0	24,4	9,7	4,9	91,0
Измельчитель «Волгарь-5»	16,2	56,5	36,7	5,2	1,5	0,1	98,0
Дробилка КДУ-2	16,0	60,8	35,1	3,3	0,8	-	86,0
Дробилка СБ-1,5	13,0	97,6	2,3	0,1	-	-	99,0

Таблица 1. 4 – Физические параметры измельчаемых материалов

Материал	Характеристика материала	Модуль деформации E в кгс/мм ²	Коэффициент Пуассона μ	Коэффициент трения материалов по стали f		Разрушающее контактное напряжение σ_p в кгс/мм ²	Критическое усилие резания $p_{кр}$ в кгс		Коэффициент износа действия на лезвие ξ
				статический	динамический		расчетное	экспериментальное	
Кукуруза	Стебель Слой	3,3 - 3,5 3,45 - 3,71	0,00775 - 0,0374 0,0394 - 0,071	0,52 - 0,54	0,41 - 0,47	1,41 - 1,81 1,62 - 1,97	8,11 - 10,3 8,05 - 10,1	7,2 - 8,0 8,1 - 9,3	0,122 - 0,127
Подсолнечник	Стебель Слой	4,0 - 4,5 4,21 - 4,6	0,0011 - 0,068 0,0269 - 0,04	0,76 - 0,80	0,52 - 0,54	1,73 - 1,98 1,8 - 2,1	8,7 - 10,26 7,3 - 11,2	8,1 - 9,3 8,86 - 10,05	0,141 - 0,148
Пшеница озимая	Стебель Слой	5 - 7 6 - 8	0,008 - 0,09 0,03 - 0,155	0,37 - 0,40	0,49 - 0,53	0,98 - 1,1 1,1 - 1,3	4,83 - 5,4 5,3 - 6,41	5,15 - 6,4 5,7 - 6,8	0,11 - 0,16
Рожь	Стебель Слой	5,5 - 6,8 6,0 - 8,2	0,0084 - 0,079 0,032 - 0,162	0,36 - 0,39	0,47 - 0,50	1,05 - 1,3 1,15 - 1,42	4,91 - 5,65 6,15 - 6,98	5,8 - 6,5 6,3 - 7,4	0,091 - 0,105
Тростник	Стебель Слой	20 - 21 21,7 - 24	0,0046 - 0,025 0,007 - 0,03	0,75 - 0,81	0,51 - 0,60	1,94 - 2,66 2,1 - 2,98	11,37 - 14,6 8,9 - 11,6	9,12 - 10,8 9,8 - 11,7	0,98 - 1,20
Лен	Стебель Слой	18 - 22 18 - 23,6	0,0047 - 0,10 0,0098 - 0,11	0,47 - 0,69	0,36 - 0,80	1,7 - 2,1 1,9 - 2,2	9,5 - 11,38 10,4 - 12,1	9,1 - 10,5 10,8 - 11,9	0,126 - 0,136
Конопля	Стебель Слой	18 - 22 18 - 24	0,0031 - 0,094 0,0097 - 0,105	0,51 - 0,59	0,47 - 0,49	1,95 - 2,53 2,03 - 2,71	9,66 - 12,32 9,35 - 12,97	9,7 - 10,9 10,95 - 12,4	0,12 - 0,139
Солома пшеничная	Стебель Слой	26 - 29 27 - 31	0,0026 - 0,056 0,004 - 0,061	0,33 - 0,39	0,26 - 0,28	2,05 - 2,91 2,3 - 3,05	9,7 - 11,5 9,8 - 12,1	9,35 - 10,4 10,5 - 11,8	0,22 - 0,235
Сено	Стебель Слой	22 - 27 22,8 - 28	0,001 - 0,104 0,004 - 0,12	0,35 - 0,39	0,48 - 0,58	1,96 - 2,6 1,99 - 2,97	9,68 - 12,4 8,97 - 12,9	9,24 - 10,2 10,8 - 12,0	0,194 - 0,21
Трава	Стебель Слой	1,8 - 2,3	0,02 - 0,14 0,061 - 0,183	0,34 - 0,92	0,56 - 0,80	0,93 - 1,27 0,98 - 1,5	4,4 - 5,37 5,3 - 6,21	4,7 - 5,8 5,67 - 6,4	0,079 - 0,084

Как видно из таблицы 1.3, промышленные измельчители грубых стебельчатых кормов не позволяют получить однородную массу сечки с размером, регламентированным зоотехническими требованиями, что обусловлено различием механико-технологических свойств стеблей в измельчаемом слое. Кроме того, видно, что машины, в которых совмещен удар и резание, более качественно осуществляют продольное дробление стеблей.

Важнейшим механико-технологическим свойством грубых стебельчатых кормов является влажность. Многими учеными и исследователями установлено, что увеличение влажности стеблей приводит к росту энергоемкости процесса измельчения и снижению степени измельчения. Кроме того, с увеличением влажности материала возрастает эффективность ножевых измельчителей, а молотковых, наоборот, снижается.

Стебельчатые корма, находясь в скирде, меняют свою влажность от 8-10% в июле-августе до 30% в январе-феврале, это необходимо учитывать при разработке новых высокоэффективных измельчителей [46, 51, 56, 88, 122].

Существенной механико-технологической характеристикой грубых стебельчатых кормов является структура. Стебель выполняет следующие основные функции: несет на себе массу растения, оказывает сопротивление статическим и динамическим нагрузкам, обеспечивает листовую поверхность водой и растворенными в ней минеральными веществами, накапливает запасы питательных веществ. У разных растений в зависимости от их биологических и морфологических особенностей те или иные функции развиты в большей или меньшей мере, вследствие чего из-за множества их комбинаций имеются разнообразные по строению стебли [96, с. 13].

Первоначалом любого растения является живая клетка, представляющая собой элементарную, обособленную целостную систему весьма сложного строения и обладающую всеми жизненными свойствами.

Клеточная оболочка обладает значительной прочностью на растяжение. В состав ее чаще всего входит целлюлоза (клетчатка), гемицеллюлоза (полуклетчатка) и пектиновые вещества. В клетке различают первичную и вторичную оболочки. Вторичная формируется на внутренней поверхности первичной и состоит, главным образом, из целлюлозы. Преобладание последней определяет высокие механические качества оболочки, особенно прочность на растяжение и эластичность.

В оболочке целлюлозные молекулы собраны в нитевидные субмикроскопические структуры, получившие название микрофибрилл. Эти структуры представляют собой чередующиеся кристаллические и аморфные зоны. Молекулы кристаллических зон строго ориентированы (их можно представить в виде бетонной массы).

Группы клеток одинакового происхождения, сходного строения и выполняющие одинаковую функцию называются тканями, которые принято подразделять на пять главных групп: образовательные, или меристемы, основные, механические, проводящие, покровные.

Распределение рассмотренных тканей относительно друг друга – закономерное следствие выполняемых стеблем механических функций (сопротивление статическим и динамическим нагрузкам).

Отсюда, под структурой стебля можно понимать рациональное распределение тканей относительно друг друга, соответствующее равновесному состоянию выполняемых ими функций на данном этапе развития растения.

Для всех растений характерно радиальное строение стебля, состоящего из кожицы и центрального цилиндра. Последний состоит из паренхимных клеток основной ткани, через которую проходит проводящая ткань. Основная ткань в поперечном сечении неоднородна, с уменьшением размера клеток прочность ее увеличивается. У некоторых растений наблюдается разрыв

паренхимных клеток центрального цилиндра, в результате чего стебель получается полым (соломина) [96, с. 14].

В обеспечении прочности тела растения и его органов принимают участие все его ткани и клетки: живые и мертвые. Наряду с тканями и клетками, играющими в теле растения роль, аналогичную роли заполнителя в железобетонных конструкциях, в растениях имеются ткани и клетки, соответствующие арматуре железобетона, пронизывающие (а иногда и обматывающие) основную массу. Ткани и клетки-одиночки подобного рода называются арматурными или механическими, а совокупность их – арматурой, стереомом или механической системой. Арматура растений может быть представлена тремя различными типами тканей и клеток: **склеренхимой, колленхимой и каменистыми клетками** (склероидами) [78, 87, 96].

Для всех типов арматурных тканей характерно: 1) мощное утолщение клеточных стенок, 2) тесное, за редкими исключениями, смыкание между клетками, 3) отсутствие перфорации в клеточных стенках [78, 87, 96].

Наиболее важной для прочности растений арматурной тканью является **склеренхима** [78, 87, 96]. Эта ткань состоит из прозенхимных клеток, которые могут быть названы толстостенными волокнами. При полном своем развитии клетки обычно не имеют содержимого, и полости их заполняются воздухом. К этому времени клеточные стенки, за редким исключением, одревесневают. Материал клеточных стенок типичной склеренхимы по прочности на разрыв и по величине предела упругости близок к конструкционной стали. Следует отметить, что по способности противостоять динамическим нагрузкам без остаточных деформаций склеренхима значительно превосходит сталь.

Ткани обычно образуют в органах растений сложные комплексы (рисунки 1.1 и 1.2), в которых они связаны единством происхождения и расположения. Одним из наиболее распространенных комплексов тканей являются проводящие пучки, которые представляют собой комплекс трех

тканей: проводящей, механической и основной, каждая из них выполняет присущую ей функцию [96, с. 18].

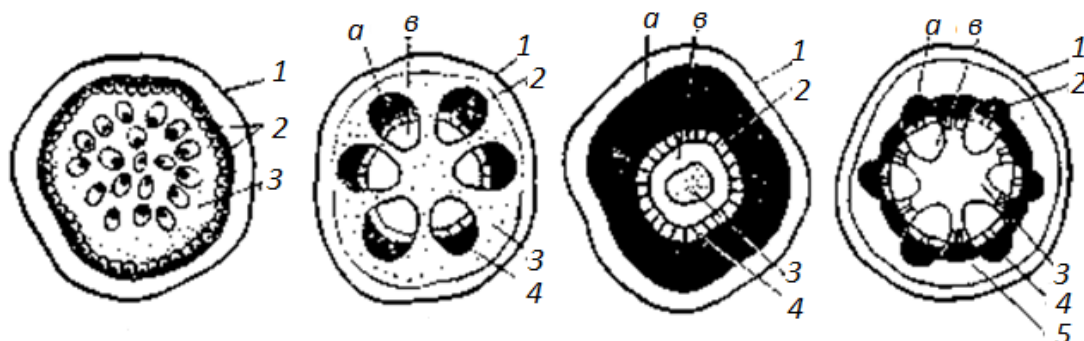


Рисунок 1.1 – Схема распределения тканей в поперечном сечении стебля:
1 – кожица; 2 – проводящая ткань; 3 – основная ткань; 4 – пучковый камбий;
5 – межпучковый камбий: а – флоэма; в – ксилема

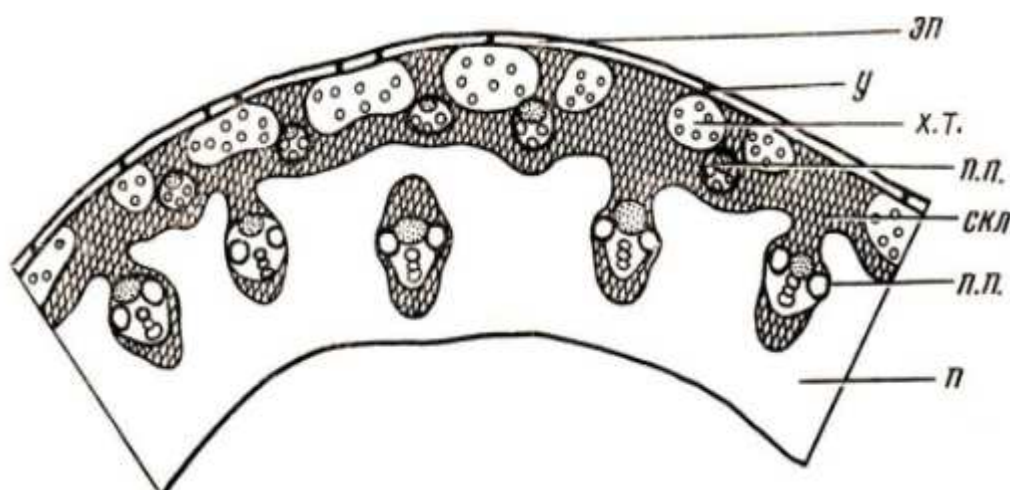


Рисунок 1.2 – Схема строения соломины ржи: *п* – паренхима;
п.п. – закрытые коллатеральные проводящие пучки; *скл* – склеренхима;
у – устьице; *х.т.* – хлорофиллоносная ткань; *эп* – эпидерма

Под общим механическим строением стеблей сельскохозяйственных растений следует понимать конкретную конструкцию из цилиндра основной ткани, армированной проводящими пучками и окаймленной плотной кожицей [96, с. 20]. Все разнообразие конструкций стеблей обусловливается распределением его проводящих пучков в основной ткани.

Принципы, по которым осуществляется это распределение, впервые были выявлены В.Ф. Раздорским [96, с. 21]. Первый учитывает воздействие

на стебель растения динамических нагрузок. Согласно этому принципу, пучки должны располагаться ближе к оси цилиндра, что позволит им, подобно пружинам, аккумулировать в себе кинетическую энергию от динамических нагрузок, не передавая ее к основанию стебля.

Второй учитывает воздействие на стебель растения статических нагрузок. Он указывает на необходимость распределения пучков в периферии цилиндра основной ткани. Это увеличивает жесткость и сопротивляемость стебля статическим нагрузкам.

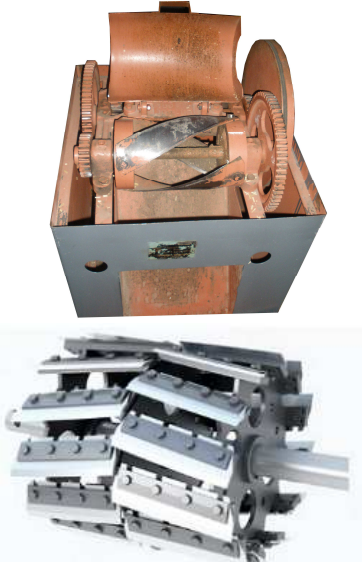
Основным недостатком при изучении механико-технологических свойств грубых стебельчатых кормов является рассмотрение стеблей и слоя стеблей как однородной среды, однако, исходя из вышеизложенного, это не совсем так. Поэтому необходимо более углубленно изучить структуру строения стеблей и определить ее влияние на эффективность процесса измельчения. А имеющийся опыт, безусловно, необходимо использовать в дальнейших исследованиях.

1.3 Анализ существующих конструкций измельчающих аппаратов

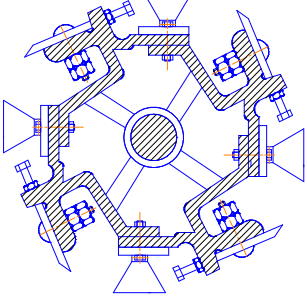
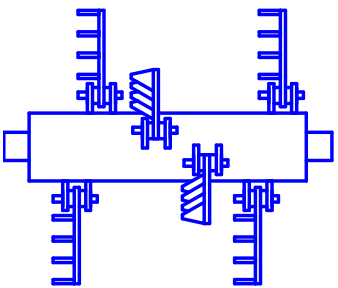
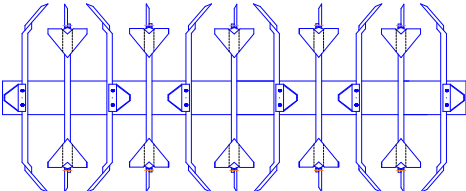
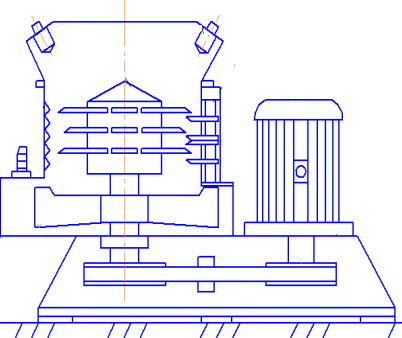
Исследование направлено на определение наиболее эффективных конструкций измельчителей грубых стебельчатых кормов и путей совершенствования их рабочих органов.

В настоящее время на фермах используются рабочие органы [5, 13, 20, 37, 48, 49, 70, 80, 85, 90, 92, 94, 103, 120, 122, 123, 134] для измельчения грубых стебельчатых кормов, которые представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Рабочие органы измельчителей грубых стебельчатых кормов

Тип рабочего органа	Марка	Разработчики и исследователи	Примечание
1	2	3	4
<p>Штифтовой</p> 	ИГК-30Б	Мельников С.В., Резник Н.Е., Ревенко И.И.	Измельчение стеблей, используя процессы излома, разрыва и перетирания при их влажности до 40%
<p>С ножами, закрепленными на крыльчатке</p> 	РСС-6, комбайн Sterh 2000	Мельников С.В., Резник Н.Е., Брагинец Н.В., Ялпачик Г.С., Ревенко И.И.	Измельчение стеблей и сочных кормов, используя резание и расщепление частиц с целью получения мягкой массы
<p>Баранный</p> 	РСБ-3,5М4, ИКВ-5А, Дон 680	Мельников С.В., Резник Н.Е., Брагинец Н.В., Ялпачик Г.С., Ревенко И.И.	Измельчение стеблей с регулируемой длиной резки без расщепления вдоль волокон

Продолжение таблицы 1.5

1	2	3	4
<p>С продольно-поперечным резанием</p> 		<p>Элли А.Я., Рустамов С.И., Горячкин В.П.</p>	<p>Измельчение стеблей резанием и расщепление частиц с целью получения мягкой массы</p>
<p>С многоплоскостным рабочим органом</p> 		<p>Аюгин П.Н., Резник Н.Е., Рустамов С.И.</p>	<p>Рабочий орган обеспечивает хорошее качество измельчения: частицы длиной 20 – 50 мм составляют 85,7%, а расщепленные частицы превышают 97%</p>
<p>Фрезбарaban</p> 	<p>ФН-1,2, ПСК-5</p>	<p>Мельников С.В., Резник Н.Е., Белянчиков Н.Н., Алешкин В.Р.</p>	<p>Представляет собой цилиндр, на поверхности которого прикреплены по винтовой линии Г-образные ножи</p>
<p>Вертикальный ножевой барабан</p> 	<p>ИСК-3, ИС-20А, ИСРВ-12, ИСК-30</p>	<p>Мельников С.В., Резник Н.Е., Ревенко И.И., Вольвак С.Ф.</p>	<p>Вертикальный барабан с несколькими рядами ножей, измельчает корм посредством взаимодействия с противорезами</p>

Продолжение таблицы 1.5

1	2	3	4
Барабан с шарнирно подвешенными ножами 	Дон-1500Б, SAMPO	Шаповалов В.И., Макаров И.В., Мельников С.В., Сыроватка В.И.	Измельчение стеблей по принципу резания пуансоном (рубка) с расщеплением частиц от удара

Как видно из таблицы 1.5., для измельчения грубых стебельчатых кормов используются конструкции с рабочими органами разного типа. Однако не все типы рабочих органов способны расщеплять стебли, хотя при измельчении растений с крупным стеблем (например, кукуруза) расщепление отсеченных частичек на куски очень важно, это позволяет создать более мягкую массу, легко поедаемую животными. Также из анализа видно, что перспективным является барабанный тип рабочего органа, поскольку он хорошо согласуется с питающим устройством и позволяет эффективно применять как ножи, так и шарнирно подвешенные молотки различной конструкции. В работе [30, 117] приведена классификация (рисунок 1.3) и сделан анализ измельчителей с шарнирно подвешенными ножами (рисунок 1.4), согласно которому главное назначение шарнирной подвески ножей – это исключить их поломку при попадании в измельчающий аппарат посторонних твердых предметов. Кроме того, при шарнирной подвеске ножей обеспечивается снижение перегрузок барабана при чрезмерной подаче массы [11].

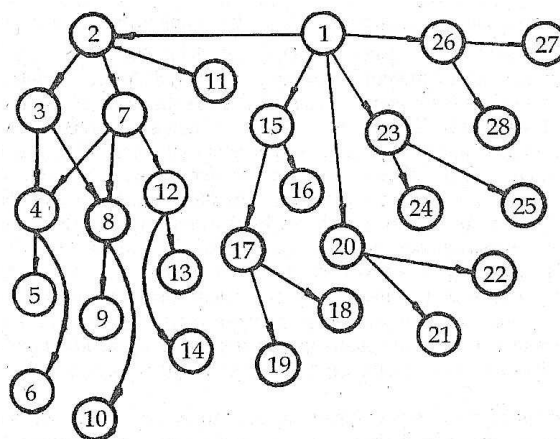


Рисунок 1.3 – Классификационный граф шарнирных ножей:

- 1 – шарнирные ножи; 2 – по количеству лезвий на одном ноже;
 3 – с одним лезвием; 4 – по расположению относительно диска,
 5 – асимметрично; 6 – симметрично; 7 – с двумя спаренными лезвиями;
 8 – по расположению лезвий на ноже; 9 – с лезвиями, расположенными
 перпендикулярно и параллельно продольной оси барабана; 10 – с лезвиями,
 расположенными под углом к продольной оси барабана; 11 – без режущих
 лезвий; 12 – по виду связи лезвий; 13 – с независимой подвеской;
 14 – с жесткой связью; 15 – по способу создания воздушного потока;
 16 – за счет лобовой поверхности лезвий; 17 – за счет установки
 дополнительных лопаток; 18 – с расположением лопаток по всей длине
 лезвий; 19 – с расположением лопаток на участках лезвий, не входящих в
 противорез; 20 – по возможности движения вокруг оси; 21 – с круговым
 вращением; 22 – с поворотом на заданный угол; 23 – по расположению
 центра тяжести; 24 – в зоне геометрической симметрии ножа;
 25 – со смещением к периферии ножа; 26 – по форме заточки лезвия;
 27 – односторонняя; 28 – двухсторонняя

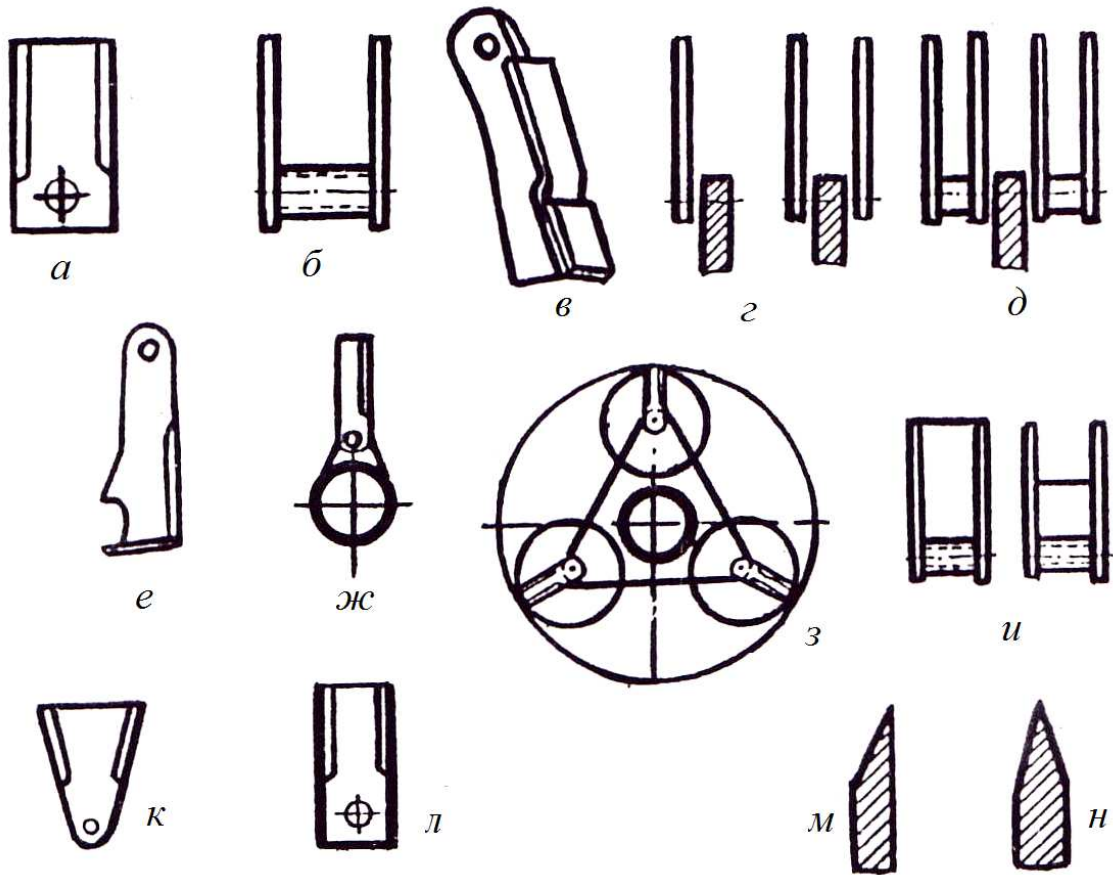


Рисунок 1.4 – Разновидности конструкций шарнирных ножей измельчающих аппаратов к зерноуборочным комбайнам

Шарнирные ножи классифицируют по количеству лезвий на ноже, по возможности движения вокруг оси подвеса, по расположению центра тяжести, по способу создания воздушного потока, по форме заточки и т.д. [30]. По количеству лезвий на ноже шарнирные ножи выполняют с одним лезвием (рисунок 1.4, *а*), с двумя спаренными лезвиями (рисунок 1.4, *б*) и вообще без лезвий (рисунок 1.4, *в*) в виде молотков [30]. При выполнении ножей со спаренными лезвиями преследуется цель снижения массы барабана за счет уменьшения количества несущих дисков. Однако однолезвийные ножи более технологичны в производстве, эксплуатации, ремонте. Они допускают использование четырех режущих кромок за счет их поворота. Ножи без лезвий (рисунок 1.4, *в*) осуществляют измельчение солоистой массы только при взаимодействии с противорежущим устройством [30]. В этих ножах не используется эффективно удар влет при захвате соломы. Ножи

различаются также по расположению относительно несущего диска. Они могут устанавливаться с асимметричным расположением относительно диска (рисунок 1.4, *з*) и симметричным (рисунок 1.5, *д*) [30]. При асимметричной установке ножей несущий диск нагружается изгибающим моментом, что нежелательно. Симметричное расположение ножей упрощает конструкцию и снижает ее массу. Следует отметить, что ножи с двумя спаренными лезвиями могут устанавливаться на диск с независимой подвеской (рисунок 1.4, *д*) и жесткой связью [1, 29, 30, 117]. Жесткая связь обеспечивает увеличение общего момента инерции режущего блока, что целесообразно при работе на увлажненной и засоренной массе. Шарнирные ножи могут выполняться с лезвиями, расположенными параллельно и перпендикулярно продольной оси барабана (рисунок 1.4, *е*) и с лезвиями, расположенными перпендикулярно оси (рисунок 1.4, *а*) [1, 29, 30, 109, 117]. Первые имеют существенные недостатки, наиболее целесообразны ножи с расположением лезвий перпендикулярно продольной оси барабана.

По возможности движения вокруг оси подвеса ножи выполняются с возможностью поворота на заданный угол (рисунок 1.4, *ж*) и с круговым вращением (рисунок 1.4, *з*) [1, 29, 30, 117]. Преимущество крепления ножей с круговым вращением заключается в безударной работе ножей об ограничитель и возможности выключения части ножей путем их поворота в зону диска и фиксации.

Для создания дополнительного воздушного потока ножи выполняются с лопатками (рисунок 1.4, *и*) и без них [30]. Ножи с дополнительными лопатками применяются в основном для одновременного измельчения и транспортирования массы в транспортные средства. При этом такие ножи могут выполняться с лопатками по всей длине, режущих кромок или только на участке, не входящем в противорежущее устройство [29, 30, 117].

По расположению центра тяжести ножи выполняют со смещением его к периферии ножа (рисунок 1.4, *к*) и с расположением в зоне геометрической

точки симметрии ножа (рисунок 1.4, л) [30]. При смещении центра тяжести ножа преследуется цель улучшения его режущих свойств. По форме заточки лезвий ножи выполняют с односторонней заточкой (рисунок 1.4, м) и двухсторонней (рисунок 1.4, н) [2]. Нож с односторонней заточкой проще в изготовлении, однако в процессе работы испытывает односторонние изгибающие усилия и кручение. Нож с двухсторонней заточкой обладает повышенной устойчивостью в работе [30].

В результате анализа видно, что эффективность рабочего органа измельчителя повышается при условии обеспечения разрушения корма в продольном и поперечном сечении слоя.

Подготовка кормов к скармливанию производится с целью повышения их эффективности через улучшение технологических свойств и быструю перевариваемость. В существующих конструкциях современных измельчителей грубых и стебельчатых кормов рабочие органы совершают следующие виды движения: поступательное, вращательное, возвратно-поступательное и колебательное.

Процесс измельчения грубых и стебельчатых кормов лезвием называется резание. Выделяют три разновидности резания: нормальное (рубка), наклонное и скользящее.

Наибольший научный интерес представляет резание со скольжением, поскольку данный вариант технологии открывает возможности минимизации затрат энергии (что является одним из направлений данного исследования). На рисунке 1.5. приведена классификационная схема режущих аппаратов Н.Е. Резника [94].

Анализ существующих конструкций измельчителей показывает целесообразность расщепления стеблей молотками или штифтами при измельчении, анализ режущих аппаратов, неоднократно проведенный многими авторитетными учеными и исследователями, показывает эффективность скользящего резания ножом. Исходя из вышесказанного

следует, что для повышения эффективности измельчителя, необходимо использовать оба фактора. Следовательно, целесообразно создать такой рабочий орган, который обеспечивает удар по стеблю и разрушает его внутреннюю структуру, а также одновременно обеспечивает скользящее резание расщепленных стеблей.

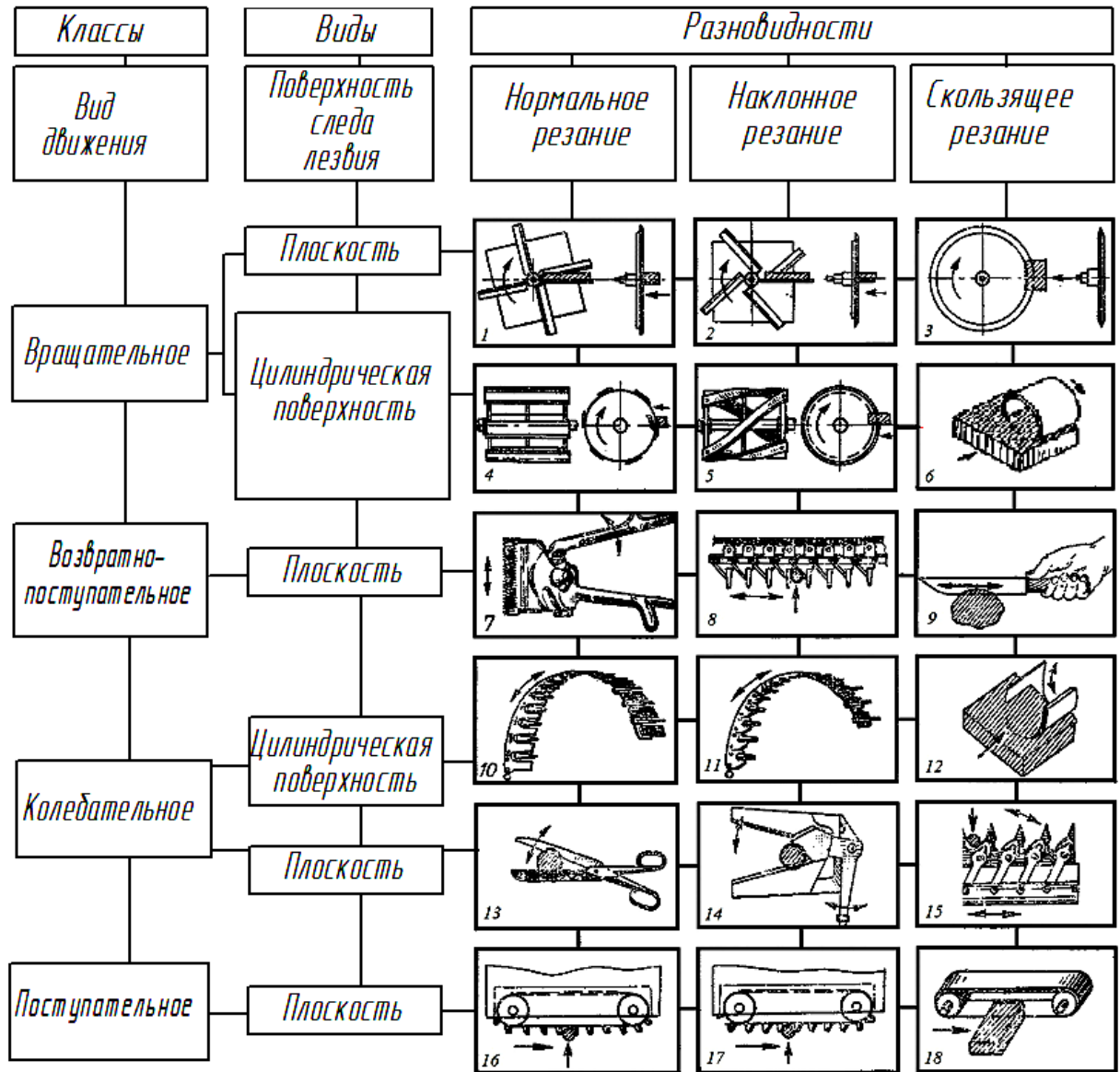


Рисунок 1.5 – Классификационная схема режущих аппаратов Н.Е. Резника

1.4 Анализ существующих теоретических исследований процесса измельчения грубых стебельчатых кормов

Развитию теории измельчения кормов посвящены труды В.П. Горячкина, В.А. Желиговского, Г.И. Бремера, Г.И. Сабельникова, С.М. Мельникова, Н.Е. Резника, Л.П. Карташова, И.И. Ревенко, В.В. Шацкого, Н.В. Брагинца, В.И. Шаповалова, С.Ф. Вольвака, С.И. Рустамова, В.И. Передни, С.И. Назарова, [21, 29, 30, 37, 48, 49, 57, 62, 70, 71, 80, 81, 85, 89, 90, 92, 94-96, 103, 116, 117, 120-122, 134] и других исследователей.

В работах вышеперечисленных исследователей раскрыта физика процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов, исследован ряд принципиальных вопросов и осуществлено математическое моделирование процесса, однако допущен ряд упрощений, требующих дальнейших научных исследований.

Теория измельчения грубых стебельчатых кормов состоит в следующем. Если слой стеблей в процессе резания прочно закреплен и не отгибается, то вид резания можно определить углом τ , образованным нормалью к режущей кромке, и направлением действия силы P_p [20, 37, 94].

Между видами резания существует тесная связь, и по мере увеличения τ они переходят один в другой. Так, при $\tau = 0$ вид резания нормальный, при $0 < \tau \leq \varphi$ - нормально-касательный без скольжения, $\tau > \varphi$ - нормально-касательный со скольжением (рисунок 1.6).

Необходимо отметить, что угол τ определяет не только вид резания, но и характер распределения деформаций в поперечном сечении стебля.

Увеличение концентрации деформаций возможно либо за счет увеличения скорости резания, либо за счет переноса деформаций из нормального направления в сторону касательного, т.е. за счет увеличения угла τ [20, 37, 94].

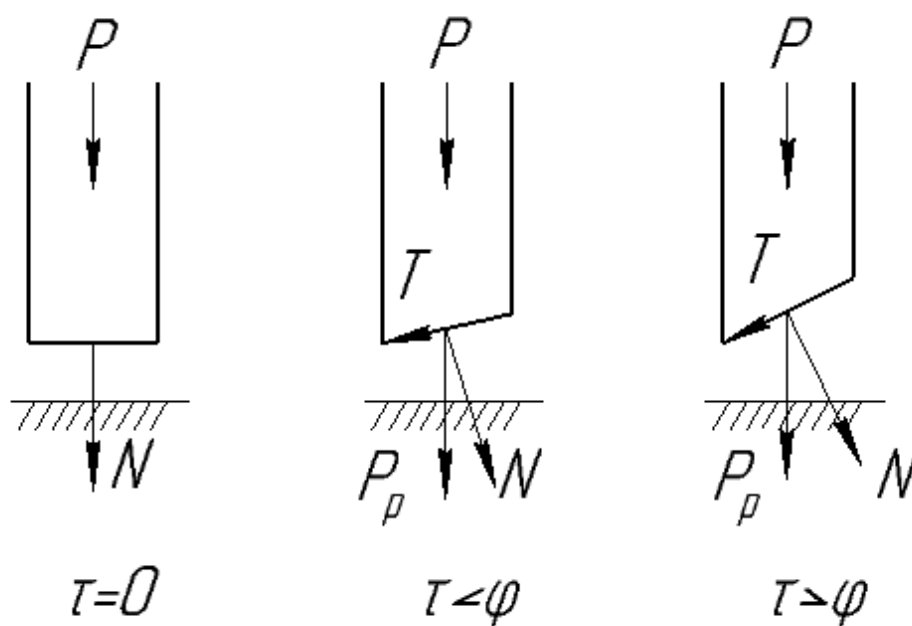


Рисунок 1.6 – Виды резания стебельчатых материалов

Для рабочего процесса режущего аппарата существенное значение имеют следующие факторы: скольжение ножа; защемление материала; удельная работа резания; физико-механические свойства материала; рабочая скорость ножа, геометрические параметры ножа, зазор в режущей паре [20, 21, 48, 49, 70, 80, 85, 90, 94, 103, 117, 120, 123, 133].

Необходимым условием обеспечения нормального протекания процесса резания является защемление материала между лезвием и противорежущей пластиной.

Ниже рассмотрены условия, при которых будет обеспечено надежное защемление материала.

На рисунке 1.7 изображен материал круглого сечения в растворе ножниц, например, подвижного ножа и неподвижной противорежущей пластины.

Таким образом, условие полного замещения запишется как [20, 21, 48, 49, 70, 80, 85, 90, 94, 103, 117, 120, 123, 133]:

$$\chi \leq 2\varphi_{\min} \quad (1.1)$$

где φ_{\min} – наименьший из углов φ_1 и φ_2 (рис 1.7).

По экспериментальным данным, в дисковых измельчителях грубых кормов $\chi = 40-50^\circ$, в барабанных - $\chi = 24-30^\circ$ [20, 21, 48, 49, 70, 80, 85, 90, 94, 103, 117, 120, 123, 133].

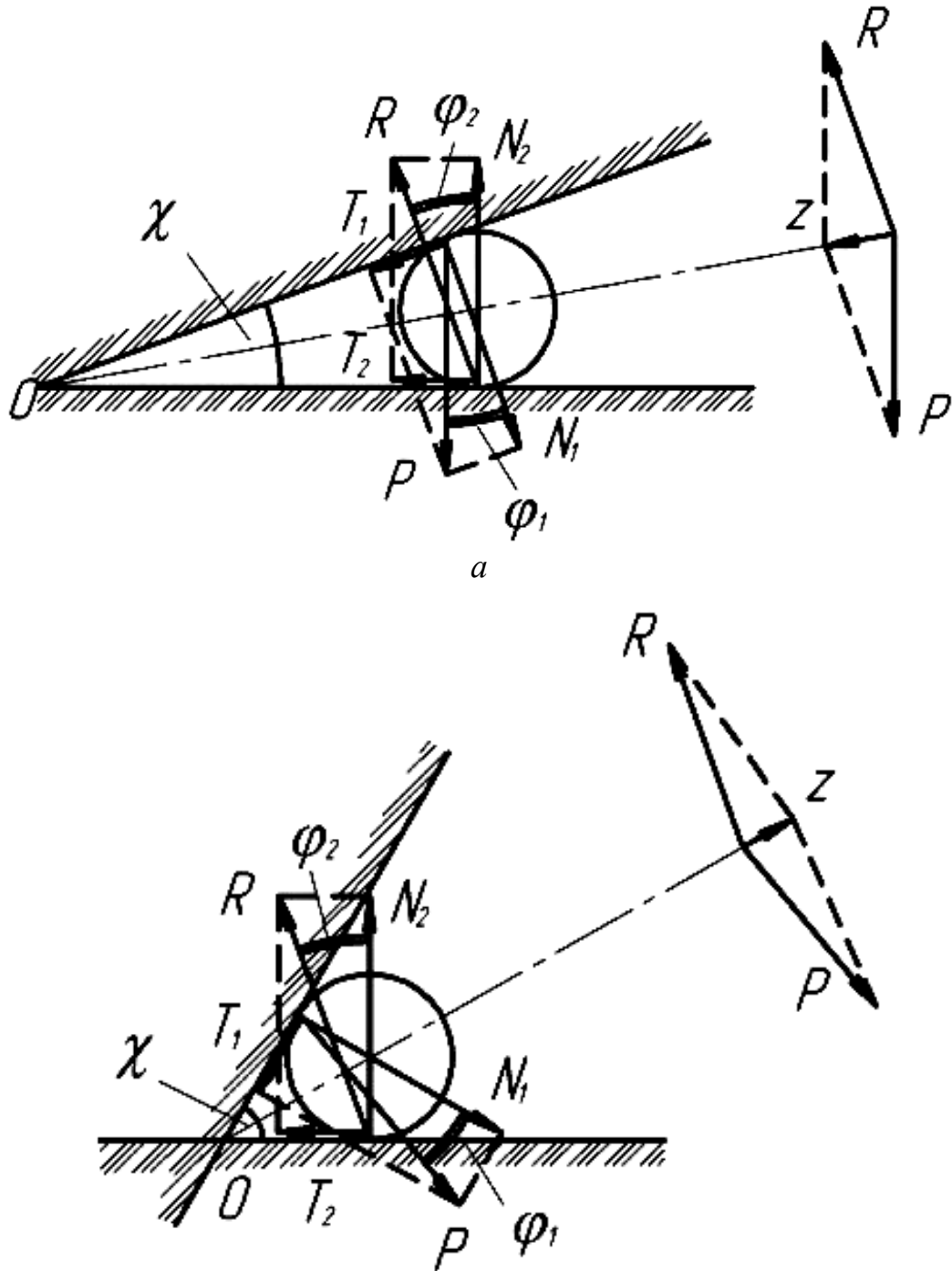


Рисунок 1.7 – Защемление материала (а) в растворе лезвий и выталкивание (б) материала из раствора лезвий

Анизотропные свойства растительных материалов при разрушении их лезвием обуславливаются видом среза, который определяется расположением плоскости среза относительно волокон растений и направлением резания. Возможные комбинации расположений плоскости среза и направлений резания определяют основные виды среза: продольный, поперечный и боковой. В практике же чаще встречаются не основные виды среза, а промежуточные: косой (продольно-поперечный), наклонный (поперечно-боковой) и продольно боковой. Возникают они в результате того, что стебли неодинаково наклонены к плоскости среза, а слой в питающем устройстве движется поступательно. Переход от одного среза к другому за счет отгиба стеблей в процессе резания неизбежно сопряжен с появлением осевых сил, негативно влияющих на эффективность процесса и долговечность режущих элементов. Сам же срез получается рваным [96, с. 89]. Статический метод построения теории нормального резания заключается в следующем.

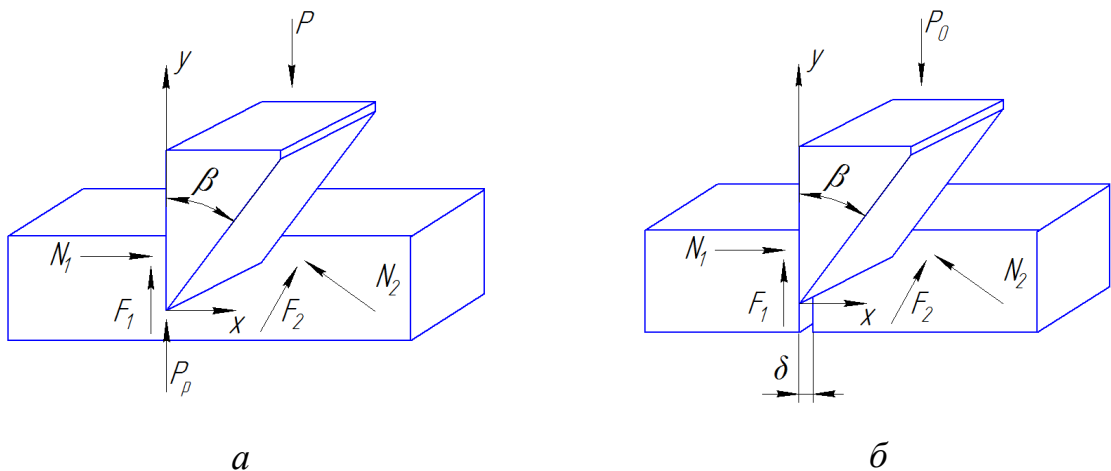


Рисунок 1.8 – Схема сил, действующих на нож при нормальном резании:
а – взаимодействие ножа со слоем материала; *б* – схема для упрощенного
 исследования

При воздействии ножа на слой материала (рисунок 1.8, *а*) на него оказывает влияние вертикальная сила P , нормальные реакции N_1 и N_2 , силы трения, действующие на боковые грани F_1 и F_2 , и сила сопротивления

резанию лезвием P_p . Считая движение лезвия равномерным, уравнение равновесия данных сил в проекции на оси x и y примет вид [96, с. 90]:

$$\begin{cases} N_1 - N_2 \cos \beta + F_2 \sin \beta = 0; \\ -P + P_p + F_1 + F_2 \cos \beta + N_2 \sin \beta = 0. \end{cases} \quad (1.2)$$

Уравнения (1.2) содержат пять неизвестных (N_1 , N_2 , F_1 , F_2 , P_p). Современными исследователями предложено следующее решение данного уравнения. При движении ножа и наличии скольжения между материалом и боковыми гранями имеют место соотношения [96, с. 90]:

$$F_1 = fN_1, \text{ Н}, \quad (1.3)$$

где f – коэффициент трения скольжения.

$$F_2 = fN_2, \text{ Н}. \quad (1.4)$$

Далее сделано допущение, что слой предварительно разрезан тонким лезвием, и нож раздвигает обе части слоя на расстояние δ (рисунок 1.8 б), равное толщине режущей кромки. В этом случае $P_p = 0$, а $P = P_0$. Исходя из вышеизложенного, получим [96, с. 90]:

$$N_1 = \frac{P_0(\cos \beta - f \sin \beta)}{2f \cos \beta + (1 - f^2) \sin \beta}, \text{ Н}, \quad (1.5)$$

$$N_2 = \frac{P_0}{2f \cos \beta + (1 - f^2) \sin \beta}, \text{ Н}. \quad (1.6)$$

Определив значения сил P и P_0 , экспериментально можно установить и рассчитать $P_p = P - P_0$.

Нормальное резание характеризуется тем, что силы P и P_0 перпендикулярны оси слоя. При скоростях резания, незначительных по сравнению со скоростью распространения деформаций в стеблях, последние почти равномерно распределяются по всему поперечному сечению стеблей. А это значит, что при нормальном резании на малых скоростях разрушение всех структур конструкции стебля (оболочка, арматура, наполнитель) происходит почти одновременно.

Данный метод имеет существенный недостаток, который заключается в том, что требуется значительное количество предварительных экспериментов

по определению P_0 . Кроме того, метод не учитывает скорость резания и влажность материала.

С изменением вида резания изменяется соотношение нормального и касательного усилий среза (рисунок 1.9). Из [20, 37, 94] известно, что с убыванием нормальной силы P_n касательная сила резания P_τ , необходимая для возникновения резания, возрастает так, что их равнодействующая R сохраняет постоянную величину:

$$R = \sqrt{P_n^2 + P_\tau^2}, \text{ Н.} \quad (1.7)$$

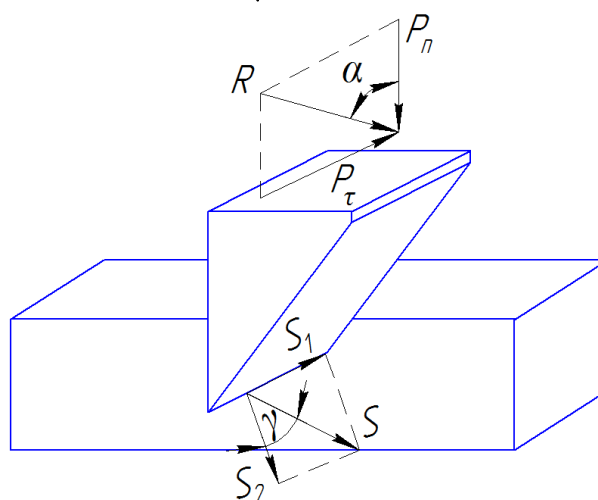


Рисунок 1.9 – Схема действующих сил

При этом изменение угла наклона равнодействующей R к нормали лезвия (α) от 0 до 39° совпадает с изменением угла направления перемещения лезвия, т.е. углы α и γ в пределах $0-39^\circ$ равны. Совпадение силы R с направлением перемещения лезвия свидетельствует об отсутствии скольжения лезвия по материалу в указанных пределах угла α (случай нормально-касательного резания без скольжения). Однако при дальнейшем уменьшении нормальной силы и соответствующем росте силы P_τ равенство α и γ нарушается, и разность их величин быстро растет. При $\gamma > \alpha$ возникает скольжение лезвия по разрезанному материалу [20, 37, 94, 96].

Перераспределение деформаций в поперечном сечении стебля возможно только благодаря наличию микрорезцов режущей кромки. Оно

приводит к постепенному разрушению волокон и объясняется облегчением проникновения лезвия в материал при нормально-касательном резании без скольжения и, особенно, при скользящем резании.

При малых скоростях резания контактные напряжения, приводящие к разрушению волокон, достигаются за счет значительных деформаций малой концентрации. С увеличением скоростей резания объемы деформаций материала уменьшаются, а концентрация деформаций увеличивается. Следовательно, совместное перемещение точек контакта волокон с режущей кромкой значительно уменьшается. В этом случае влияние угла заточки на процесс проникновения лезвия в материал незначительно. Но вместе с тем, положительное влияние малых углов заточек неоспоримо и объясняется тем, что они способствуют увеличению концентрации деформаций растительного материала [20, 37, 62, 94, 95, 96, 116].

Метод построения теории нормально-касательного резания со скольжением заключается в следующем.

При воздействии ножа на слой материала (рисунок 1.10, *a*) на него влияет вертикальная сила P_n , нормальные реакции N_1 и N_2 , силы трения, действующие на боковые грани F_1 и F_2 , сила трения F_3 , действующая на лезвие, сила сопротивления резанию Q .

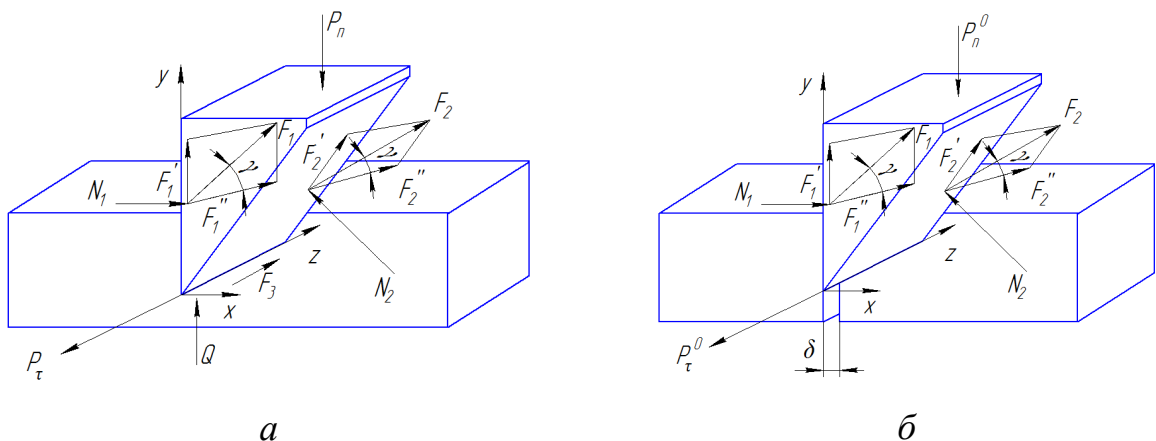


Рисунок 1.10 – Схема сил, действующих на нож при скользящем резании:

a – полная схема: *б* – упрощенная схема

Считая движение ножа равномерным, уравнения данных сил в проекциях на x , y , z примут вид [96, с. 93]:

$$\begin{cases} -P \sin \alpha + Q + F_2 \sin \gamma \cos \beta + F_1 \sin \gamma + N_2 \sin \beta = 0; \\ N_1 - F_2 \sin \beta \sin \alpha - N_2 \cos \beta = 0; \\ P \cos \alpha - F_3 - F_1 \cos \alpha - F_2 \cos \alpha = 0. \end{cases} \quad (1.8)$$

Аналогично случаю нормального резания, описанному выше, проводится упрощение (рисунок 1.10, б). В этом случае $Q = 0$, $F_3 = 0$, а $P = P_0$ [96, с. 93]:

$$\begin{cases} -P \sin \alpha + fN_2 \sin \gamma \cos \beta + fN_1 \sin \gamma + N_2 \sin \beta = 0; \\ N_1 - fN_2 \sin \beta \sin \alpha - N_2 \cos \beta = 0; \\ P_0 \cos \alpha - fN_1 \cos \gamma - fN_2 \cos \gamma = 0. \end{cases} \quad (1.9)$$

$$N_1 = \frac{P_0 \sin \alpha (\cos \beta - f \sin \gamma \sin \beta)}{2f \sin \gamma \cos \beta + (1 - f^2 \sin^2 \gamma) \sin \beta}, \text{ Н.} \quad (1.10)$$

$$N_2 = \frac{P_0 \sin \alpha}{2f \sin \gamma \cos \beta + (1 - f^2 \sin^2 \gamma) \sin \beta}, \text{ Н.} \quad (1.11)$$

Подставив значения N_1 и N_2 в уравнение (1.9) можно получить соотношение углов α и γ [96, с. 94]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2f \sin \gamma \cos \beta + (1 - f^2 \sin^2 \gamma) \sin \beta}{(1 + \cos \beta - f \sin \gamma \sin \beta) \cos \gamma}, \text{ Н.} \quad (1.12)$$

Метод прост и позволяет решать приближенные задачи. Недостатком является то, что для определения угла γ необходимо экспериментальное определение угла α , который не постоянен. Также, метод не учитывает скорость резания и механико-технологические свойства измельчаемого материала. Кроме того, сила сопротивления резания вообще не моделируется.

Многие исследователи предлагают силу резания определять из выражения [20, 37, 76, 88, 89, 94, 96]:

$$P_p = 2EF \operatorname{tg} \alpha \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \text{ Н,} \quad (1.13)$$

где E – модуль Юнга, МПа;

F – площадь поперечного сечения перерезаемого материала, мм.

Недостатком выражения является тот факт, что все механико-технологические свойства измельчаемого материала характеризуются только модулем упругости.

Следует отметить, что при разработке теории резания учитывают конструктивный угол резания α_1 (рисунок 1.11) [20, 29, 30, 48, 49, 62, 80, 81, 85, 90, 92, 117, 121, 123, 133].

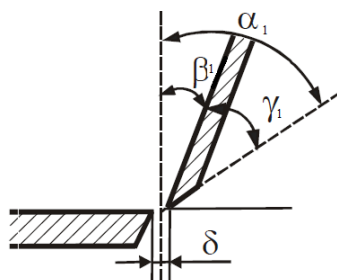


Рисунок 1.11 – Схема режущей пары

$$\alpha_1 = \gamma_1 + \beta_1, \text{ град} \quad (1.14)$$

где γ_1 - угол заточки ножа;

β_1 - угол установки ножа.

Для измельчителей грубых кормов угол заточки ножа $\gamma_1 = 12-22$ градуса. Нижний предел угла заточки обусловлен прочностью материала, а верхний – экономичностью режимов резания.

Из анализа условий резания лезвием следует, что для рабочего процесса измельчителей грубых кормов основное значение имеют такие параметры, как нормальное давление ножа на материал и боковое скользящее движение ножа. Количественное соотношение между этими параметрами характеризуется значениями коэффициента скольжения и коэффициента скользящего резания.

Зазор между лезвием ножа и противорежущей пластиной δ должен быть в пределах 0,5-4,6 мм [90, с.6].

Проведённый анализ показывает, что общепринятая теория резания не учитывает ряд существенных явлений, важнейшим из которых является неоднородная структура строения измельчаемых стеблей. Кроме того, не всегда учитывается динамика процесса разрушения стеблей, в частности удар

по стеблю. Видно, что единого мнения о теории измельчения грубых стебельчатых кормов ученые еще пока не сформировали [20, 37, 76, 81, 89, 94].

Особенностью барабанных режущих аппаратов является то, что угол α наклона ножа относительно противорежущей пластины и угол χ защемления равны друг другу. Поэтому анализ схемы цилиндрического режущего аппарата в плоскости, перпендикулярной к плоскости резания, сводится к рассмотрению таких его параметров, как толщина h разрезаемого слоя, высота a расположения вала барабана над противорежущей пластиной, диаметр барабана D во взаимосвязи со скоростями v_{cl} , подачи слоя материала и скорости v_b вращения барабана. Траектория ножей барабана относительно слоя материала с учетом одновременного вращения ножей вокруг оси барабана с угловой скоростью ω и подачи на барабан слоя массы со скоростью v_{cl} может быть представлена в виде трохойды (рисунок 1.12), уравнение которой в неподвижных осях координат OX и OY будет [2, 6, 37, 53, 92, 94, 110, 122]:

$$x = v_{cl}t + \frac{D}{2} \cos \omega t; \quad y = \frac{D}{2} (1 - \sin \omega t) \quad (1.15)$$

где t – время, за которое барабан повернулся на угол ωt .

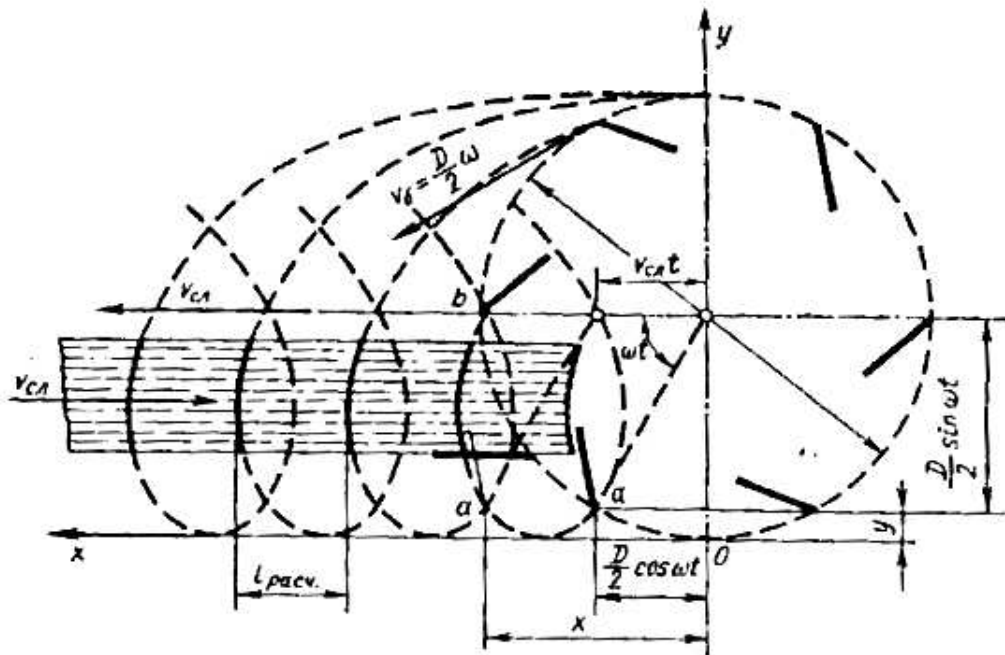


Рисунок 1.12 – Траектория движения лезвий ножей барабана

Здесь принято допущение, что не слой массы движется поступательно на барабан, а барабан на неподвижный слой со скоростью слоя.

При построении последовательных положений ножа (рисунок 1.12) соотношение скоростей v_b и v_{cl} принято близким к единице, что придало трохоиде вытянутую форму [37, 90]. Данное предположение является существенным недостатком предложенной теории, поскольку в реальности скорость слоя значительно ниже скорости барабана.

Расстояния между любыми однородными точками смежных отрезков трохойды равны между собой и являются расчетной длиной резки $l_{расч}$ [85, 89]. Эту длину можно определить, если значение абсциссы x вычесть из значения абсциссы x_b последующего ножа при условии равенства их ординат $y=y_b$ для обоих последующих положений, т. е. [37, 94]:

$$l_{расч} = x_b - x \quad (1.16)$$

Пусть центральный угол между ножами [6, 37, 94]:

$$\theta = 2\pi/z, \quad (1.17)$$

где z – число ножей па барабане.

Из уравнения (1.15) можно написать [85, 88]:

$$\sin \omega t = \frac{R-y}{R}, \quad (1.18)$$

где $R = \frac{D}{2}$; отсюда [85, 88, 129]:

$$\cos \omega t = \sqrt{1 - \left(\frac{R-y}{R}\right)^2}, \quad (1.19)$$

Подставляя значение $\cos \omega t$ в уравнение (1.15), получим [85, 88]:

$$x = v_{cl}t + R\sqrt{1 - \left(\frac{R-y}{R}\right)^2}, \quad (1.20)$$

Нож b достигнет в слое положения a с опозданием на время Δt , необходимое для поворота барабана на угол θ , т. е. [85, 88]:

$$\Delta t = \frac{\theta}{\omega} \quad (1.21)$$

Следовательно, абсцисса для нового положения ножа b [85, 88]:

$$x_b = v_{cl}(t + \Delta t) + R\sqrt{1 - \left(\frac{R - y_b}{R}\right)^2} \quad (1.22)$$

Подставив значение Δt и учитывая, что $y_b = y$ согласно выражению (1.16), получим [6, 37, 94, 110]:

$$l_{расч} = x_b - x = v_{cl}\left(t + \frac{\theta}{\omega}\right) + R\sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2} - v_{cl}t - R\sqrt{1 - \left(\frac{R - y}{R}\right)^2} \quad (1.23)$$

Откуда [85, 88, 110]:

$$l_{расч} = v_{cl} \frac{\theta}{\omega} \quad (1.24)$$

Подставляя значения θ и ω , получим [37, 94, 134]:

$$l_{расч} = v_{cl} \frac{2\pi}{2\pi n z} = \frac{v_{cl}}{n z} \quad (1.25)$$

Анализ литературных данных показывает, что на данном этапе развития науки и техники необходимо продолжать исследования процесса измельчения стебельчатых кормов как теоретически, так и экспериментально. При этом необходимо теоретически обосновать конструктивно-технологические параметры рабочего органа измельчителя, способного одновременно расщеплять стебли, разрушая его внутреннюю структуру и осуществлять скользящее резание расщепленных стеблей.

Обоснование данных конструктивно-технологических параметров, опираясь на анализ существующих научных исследований, целесообразно проводить с применением методик построения математических моделей, которые будут учитывать меньшее количество поправочных коэффициентов. Как известно, большинство поправочных коэффициентов в теории измельчения стебельчатых кормов являются функциями многих переменных, требующих серьезных исследований.

Анализ показал, что существующих теоретических предпосылок для разработки и конструирования новых эффективных измельчителей недостаточно. Теория требует дальнейшей систематизации и доработки.

Выводы

Для достижения поставленной цели необходимо решить **задачи исследования:**

1. Для измельчения грубых стебельчатых кормов наиболее перспективным является барабанный тип рабочего органа, поскольку он хорошо согласуется с питающим устройством и позволяет эффективно применять как ножи, так и шарнирно подвешенные молотки различной конструкции.

2. Для измельчения грубых стебельчатых кормов наиболее перспективным является скользящее резание, поскольку данный вид измельчения, реализованный в эффективных барабанных измельчителях, не требует применения сложных рабочих органов и позволяет снизить энергоемкость процесса измельчения за счет рационального распределения сил, действующих на измельчаемые стебли. Кроме того, конструкция рабочих органов, обеспечивающих скользящее резание, позволяет снизить материалоемкость барабанных измельчителей.

3. Повысить эффективность процесса измельчения грубых стебельчатых кормов можно путем совершенствования рабочего органа измельчителя. Усовершенствованный рабочий орган должен одновременно расщеплять стебли, разрушая его внутреннюю структуру, и осуществлять скользящее резание расщепленных стеблей.

4. В настоящее время теория измельчения грубых стебельчатых кормов нуждается в разработке ряда новых математических моделей, адекватно описывающих процесс разрушения стеблей в камере измельчения. Данные модели должны позволять на этапе проектирования безошибочно определять оптимальные конструктивно-технологические параметры новых измельчителей и режимы их работы. Полученные на основании новых математических моделей оптимальные конструктивно-технологические параметры позволят конструкторам измельчителей грубых стебельчатых кормов обладать более

полной информацией о проектируемом объекте, что, как следствие, повысит эффективность их разработки и изготовления в условиях производства.

Исследование направлено на разработку конструкции нового измельчителя, характеризующегося низкой энергоёмкостью и применимостью в современных поточно-технологических линиях кормоприготовления, что послужит одним из путей решения задачи повышения эффективности процесса механизированного приготовления грубых стебельчатых кормов. Кроме того, у нового измельчителя для приготовления кормов диапазон регулирования параметров должен быть широким, чтобы обеспечивалась подстройка машины как можно к большему количеству условий работы (например, измельчение сена, соломы, стеблей кукурузы, сорго, обмолоченных стержней початков кукурузы и т.д.).

На основании проведенного анализа выдвигается концепция эффективной механизации приготовления грубых стебельчатых кормов путем разработки и внедрения в производство нового измельчителя, способного легко подстраиваться к многообразию условий работы.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ

Целью теоретических исследований является математическое обоснование технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами.

2.1. Обоснование конструктивно-технологической схемы нового измельчения грубых и стебельчатых кормов

Конструктивно-технологическая схема нового измельчителя грубых стебельчатых кормов приведена на рисунке 2.1.

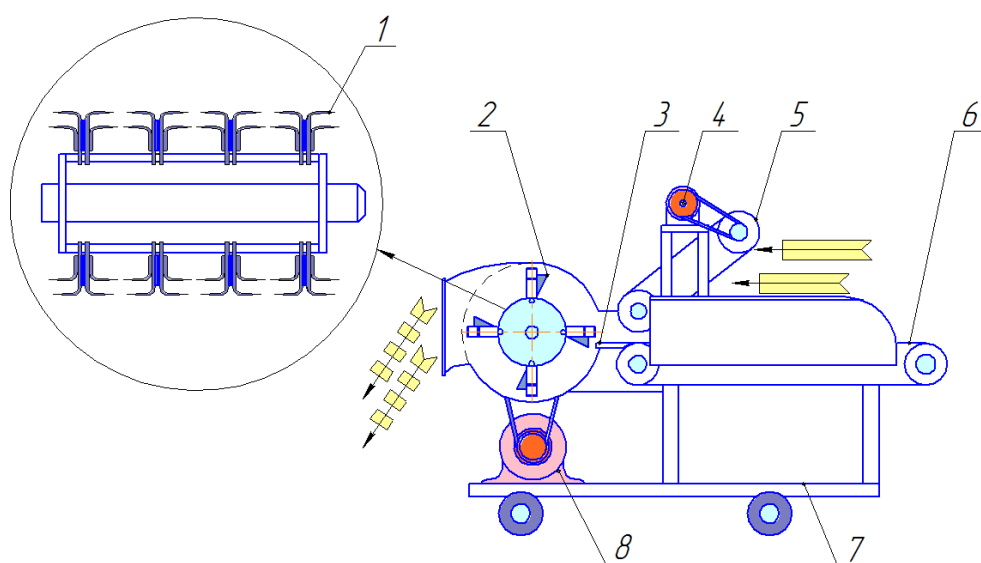


Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых стебельчатых кормов: 1 – поперечные серповидные лезвия; 2 – вертикальные клиновидные лезвия; 3 – противорез; 4 – привод питателя; 5 – прижимной транспортер; 6 – продольный транспортер; 7 – рама с колесами; 8 – привод барабана;

←  – неизмельченные стебли

←  – измельченные стебли

Новый измельчитель грубых стебельчатых кормов включает: систему загрузки (СЗ), камеру измельчения (КИ) и систему выгрузки (СВ) (рисунок 2.2).

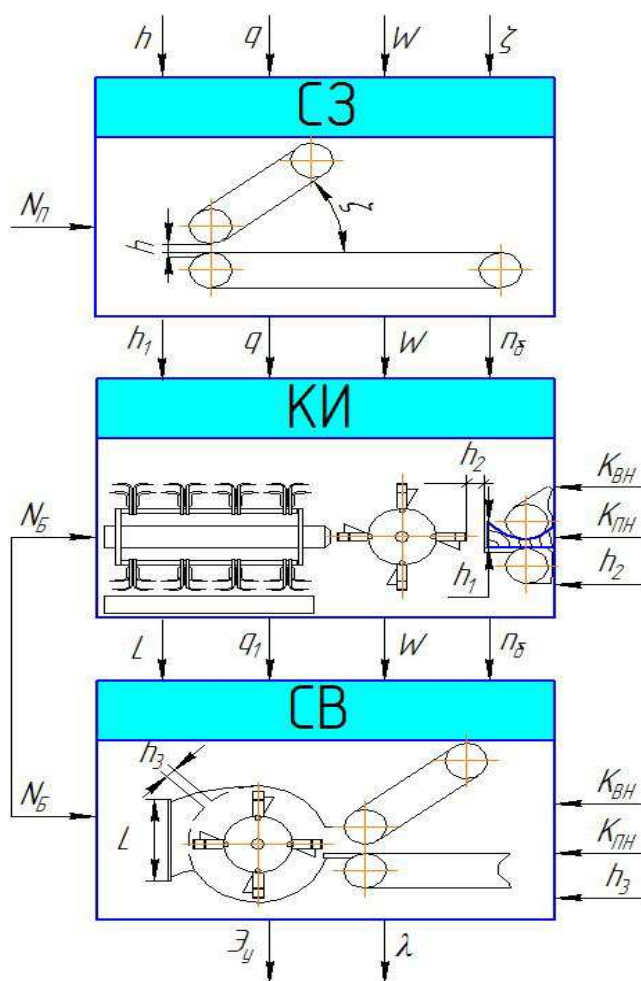


Рисунок 2.2 - Метод черного ящика: СЗ – система загрузки; КИ – камера измельчения; СВ – система выгрузки; h – зазор между вальцами питающих транспортеров; q – подача материала в камеру измельчения; W – влажность материала; ζ – угол наклона прижимного транспортера; N_{II} – мощность на привод питателя; h_1 – толщина перерезаемого слоя; n_{δ} – частота вращения барабана; h_2 – зазор между ножами и противорезом; K_{BH} – количество вертикальных лезвий; $K_{ПН}$ – количество поперечных лезвий; N_B – мощность на привод барабана; L – размеры выгрузного окна; q_1 – подача измельченного материала; h_3 – размер ячейки решета; h_4 – зазор между серповидными лезвиями \mathcal{E}_y – удельная энергоемкость процесса измельчения; λ – степень измельчения

В качестве рабочего органа предложен барабан со свободно подвешенными комбинированными ножами, включающими вертикальные клиновидные и поперечные серповидные лезвия. Рабочий орган обеспечивает совмещение способа резания пуансоном (рубки) и резание со скольжением.

Измельчитель работает следующим образом [119]. Неизмельченные стебли укладываются оператором на горизонтальный транспортер, затем они, перемещаясь, сжимаются посредством прижимного транспортера и в спрессованном виде подаются в измельчающий аппарат, где осуществляется опорное резание. Вертикальные клиновидные лезвия расщепляют часть стеблей в продольном направлении, комбинированные ножи теряют скорость, при этом обеспечиваются рациональные условия для скользящего резания поперечными серповидными лезвиями. Однако ударное действие (рубка) частично сохраняется, и отсекаемые частицы стебля расщепляются на куски в результате разрыва армирующих прожилок стебля. При этом сопротивление резанию слоя снижается. Измельченные частички стеблей воздушным потоком выводятся через выгрузную горловину, в которой установлено решето. Решето позволяет недопустимо длинные частички стеблей отправить на доизмельчение.

На основании расчетной модели функционирования (метод черного ящика [16, 18, 19, 29, 30, 31, 34, 35, 40, 45, 54, 63, 117, 118] (см. рисунок 2.2)) можно выявить, что процесс измельчения грубых стебельчатых кормов сложный, а его эффективность зависит от большого количества действующих факторов. Эффективность процесса количественно и качественно оценивается двумя показателями: удельной энергоемкостью \mathcal{E}_y и степенью измельчения λ . При этом функция взаимосвязи параметров принимает вид:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_y = \Phi\left(\frac{N_{II}, N_B, h, h_1, n_{\sigma}}{q, q_1, \zeta, W, L, h_3, K_{BH}, K_{PH}}\right); \\ \lambda = \Phi(h, q, W, \zeta, h_1, n_{\sigma}, h_2, K_{BH}, K_{PH}, L, h_3). \end{cases} \quad (2.1)$$

Проведенный анализ конструктивных особенностей измельчителей грубых стебельчатых кормов, строения стебля кормовых культур, существующих теоретических исследований и функции взаимосвязи параметров (2.1) позволяет заключить следующее.

При резании лезвием материал разрушается под действием давления вершины двухгранного угла рабочей части ножа, называемой лезвием. Рабочий процесс резания материала лезвием состоит из двух этапов: предварительного уплотнения и резания (рисунок 2.3) [20, 26, 31, 32, 37, 48, 91, 94, 96, 125, 127, 128].

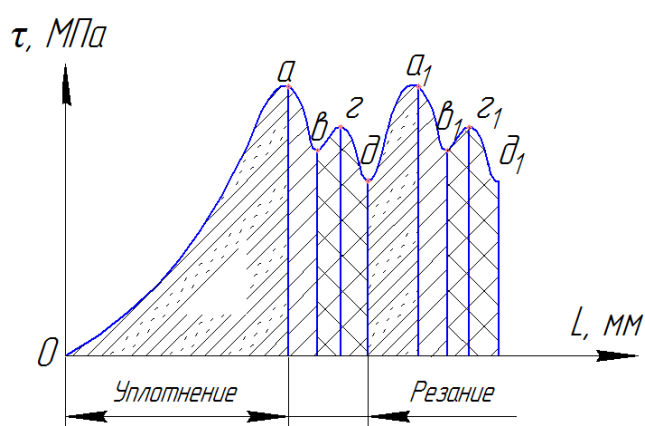


Рисунок 2.3 – Рабочий процесс резания материала лезвием

Начало кривой (0, a) – это процесс сжатия стебля. Сам процесс измельчения единичного стебля характеризуется поочередной сменой упругих деформаций армирующих прожилок стебля (d , a_1) их пластической деформацией (a_1 , b_1), а затем сменой упругих деформаций основного материала стебля (b_1 , z_1) и его пластической деформацией (z_1 , d_1). Процесс измельчения, без учета сжатия, четырехэтапный, а как следствие, рабочий орган должен быть таким, чтобы все этапы выполнялись эффективно.

Из сказанного ранее можно сделать следующее научное предположение. Повысить эффективность технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов можно путем применения рабочего органа, оснащенного свободно подвешенными комбинированными

ножами, включающими вертикальные клиновидные и поперечные серповидные лезвия, позволяющие рационально создавать все необходимые упругие и пластические деформации измельчаемого материала при сочетании рубки и скользящего резания.

Из вышеизложенного следует, что сопротивление резанию равно:

$$P_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n P_1 + \sum_{j=1}^m P_2, \text{ Н.} \quad (2.2)$$

где P_1 – сопротивление резанию армирующих прожилок стебля, Н;

P_2 – сопротивление резанию основного материала стебля, Н;

n – количество армирующих прожилок стеблей находящихся в перерезаемом слое, штук;

m – количество слоев основного материала стеблей, находящихся в перерезаемом слое, штук.

В процессе работы комбинированные ножи могут совершать следующие действия: расщепление стебля вертикальными клиновидными лезвиями (рисунок 2.4, а), резание стебля серповидными лезвиями, установленными в несколько ярусов (рисунок 2.4, б) и одновременное действие двух видов лезвий (рисунок 2.4, в).

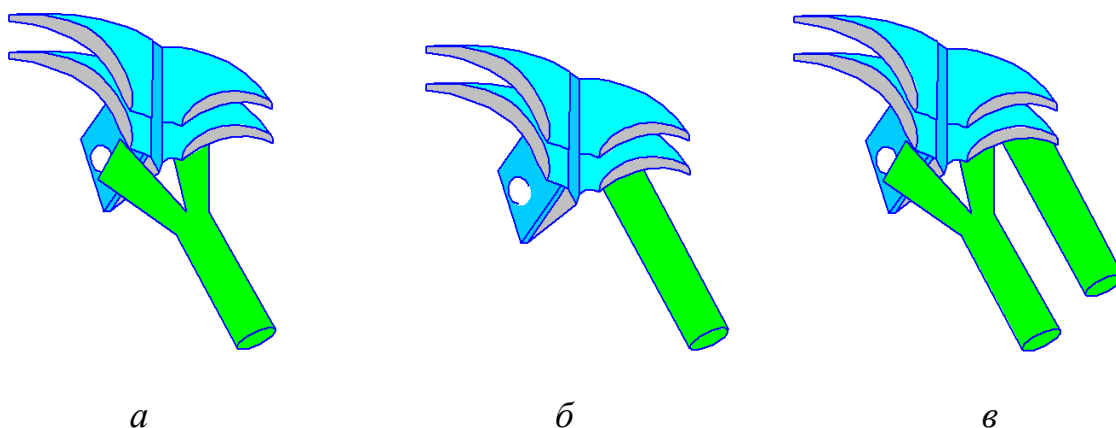


Рисунок 2.4 – Виды взаимодействия комбинированного ножа со стеблем

При любом виде взаимодействия комбинированных ножей со стеблем процесс резания можно разделить на этап изменения формы поперечного

сечения стебля от круглой к эллиптической (сжатие стебля) и этап изменения площади среза во времени. Динамика протекания этапов во времени зависит от конструктивных особенностей лезвий, режимов резания и конструктивно-структурных характеристик тела стебля.

Для определения конструктивных особенностей рабочего органа и режимов резания необходимо провести теоретические исследования.

2.2. Теоретическое обоснование производительности измельчителя

Производительность измельчителя – это способность рабочего органа в единицу времени t , всеми ножами одновременно отсекал (отрезать) некоторую площадь (или объем) от суммарного поперечного сечения (или объема), подаваемого на измельчение слоя грубых стебельчатых кормов.

$$W_{us} = \frac{n_n S_c}{t}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (2.3)$$

где S_c – площадь поперечного сечения частицы стебля, отсекаемая серповидным лезвием;

n_n – количество лезвий на ноже.

Сечение стебля в сжатом виде представляет собой эллипс, математическое каноническое уравнение которого имеет вид [4, 7-10, 33, 41, 44, 48, 67, 111, 114]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2.4)$$

где a – большая полуось;

b – малая полуось.

Из выражения 2.4. следует [12, 33, 104]:

$$y = \pm b^2 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} = \pm \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (2.5)$$

Верх эллипса [23, 24, 41, 52, 66, 77, 105, 107]:

$$y = f(x) = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (2.6)$$

Низ эллипса [23, 24, 41, 52, 66, 77, 105, 107]:

$$y = -f(x) = -\frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2}. \quad (2.7)$$

В своей работе [93] Н.Е. Резник доказал, что наиболее рациональной формой криволинейного лезвия ножа является форма спирали Архимеда.

Уравнение Архимедовой спирали в полярной системе координат [4, 7-11, 14, 33, 41, 44, 47, 67, 91, 97, 103, 111, 114]:

$$\rho = \rho(\varphi) = \varphi_0 + k\varphi, \quad (2.8)$$

где φ_0 – начальное угловое положение;

φ – угол поворота луча, по которому перемещается точка, описывающая траекторию спирали;

k – смещение точки по лучу.

Схема резания единичного стебля приведена на рисунке 2.5.

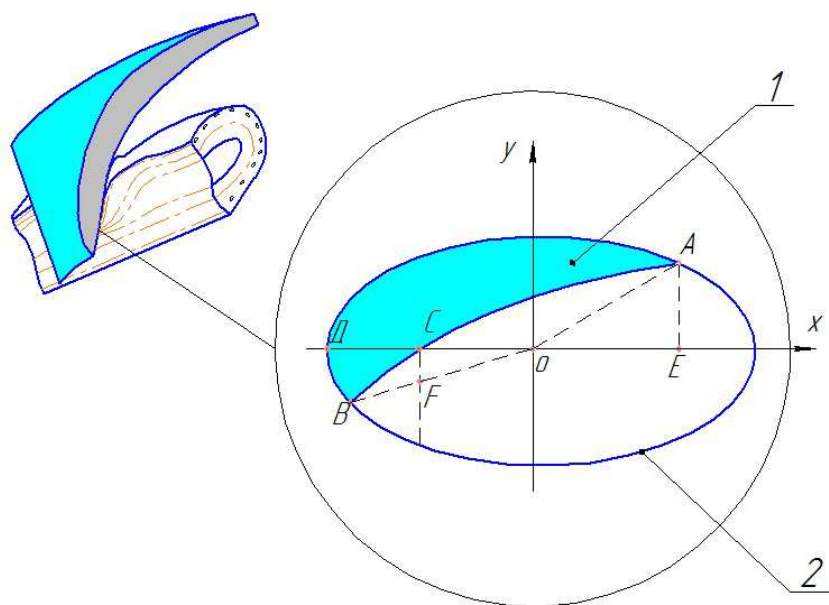


Рисунок 2.5 – Сечение стебля в процессе резания:

1 – площадь поперечного сечения стебля, отсекаемая ножом;

2 – поперечное сечение стебля в сжатом виде

Площадь поперечного сечения стебля, отсекаемая ножом, определяется при помощи определенного интеграла. Пределы интегрирования

(координаты точек A и B) получим из системы уравнений $\pm f(x)$. В полярных координатах $\rho = f(\varphi)$ и уравнения $\rho = \rho(\varphi)$.

$$\rho = f(\varphi) \quad \varphi(a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi) = a^2 b^2. \quad (2.9)$$

$$\text{Получим} \quad \begin{cases} \rho = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}} \\ \rho = \varphi \end{cases} \quad (2.10)$$

Уравнение алгебраически не решается, запишем значение в общем виде:

$$A(\varphi_A, \rho_A) \text{ или } A(x_A, y_A). \quad (2.11)$$

$$B(\varphi_B, \rho_B) \text{ или } B(x_B, y_B). \quad (2.12)$$

$$C(-\varphi_0 - k\pi; 0). \quad (2.13)$$

$$D(-a, 0). \quad (2.14)$$

Интегрировать $f(x)$ целесообразно в декартовых, а $\rho(\varphi)$ в полярных координатах, получим:

$$\begin{aligned} S_c &= \int_{x_o}^{x_A} f(x) dx + \int_{x_o}^{x_B} f(x) dx - \int_{\varphi_A}^{\varphi_C} \rho^2(\varphi) d\varphi - S_{\Delta OAE} + \left(\int_{\varphi_C}^{\varphi_B} \rho^2(\varphi) d\varphi - S_{\Delta OCF} \right) = \\ &= \frac{b}{a} \int_{-a}^{x_A} \sqrt{a^2 - x^2} dx + \frac{b}{a} \int_{-a}^{x_B} \sqrt{a^2 - x^2} dx - \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} (\varphi_o + k\varphi)^2 d\varphi - \frac{x_A y_A}{2} - \frac{(\varphi_o + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi_B}{2} = \\ &= \left(\frac{bx}{2a} \sqrt{a^2 - x^2} + \frac{ab}{2} \arcsin \frac{x}{a} \right) \Big|_{-a}^{x_A} + \left(\frac{bx}{2a} \sqrt{a^2 - x^2} + \frac{ab}{2} \arcsin \frac{x}{a} \right) \Big|_{-a}^{x_C} - \\ &- \frac{1}{k} \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} (\varphi_o + k\varphi)^2 d(\varphi_o + k\varphi) - \frac{x_A y_A + (\varphi_o + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi_B}{2} = \\ &= \frac{bx_A}{2a} \sqrt{a^2 - x_A^2} + \frac{ab}{2} \arcsin \frac{x_A}{a} + \frac{bx_C}{2a} \sqrt{a^2 - x_C^2} + \frac{ab}{2} \arcsin \frac{x_C}{a} + \\ &+ \frac{ab}{2} \arcsin(-1) - \frac{x_A y_A + (\varphi_o + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Проведя окончательные преобразования (2.15), получим:

$$S_c = \frac{b}{2a} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \frac{3ab\pi + x_A y_A (\varphi_o + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2} \quad (2.16)$$

Объединяя (2.3) и (2.16), получим:

$$W_{us} = \frac{bn_n}{2at} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \frac{3ab\pi + x_A y_A (\varphi_o + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2.17)$$

Приведенные выше теоретические предпосылки основаны на предположении, что в процессе измельчения под действием сил удара и резания отсекаемая частица стебля будет расщеплена на несколько частей в продольной плоскости.

В общем случае процесс измельчения стебельчатых кормовых материалов серповидными лезвиями комбинированных ножей протекает следующим образом.

Этап 1. Лезвие находится в непосредственной близости со стеблем (до начала контакта), а стебель сохраняет цилиндрическую форму (рисунок 2.6).

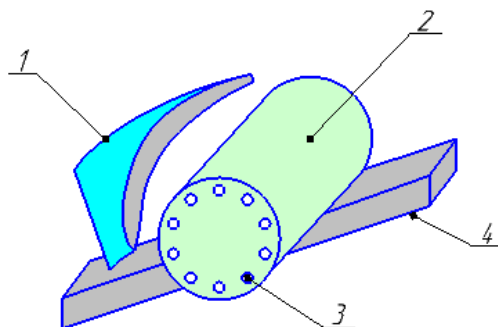


Рисунок 2.6 – К обоснованию процесса измельчения: 1 – серповидное лезвие комбинированного ножа; 2 – стебель; 3 – армирующие прожилки; 4 – противорежущая пластина

Этап 2. Начало контакта (момент упругих деформаций армирующих прожилок и стебля), при этом стебель сжимается и его круглое сечение переходит в эллипс (рисунок 2.7).

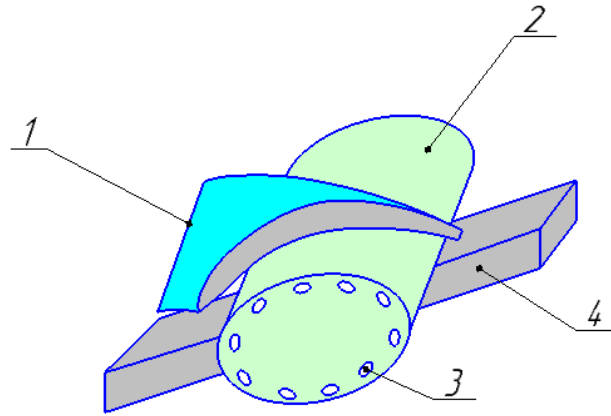


Рисунок 2.7 – Преобразование круглого сечения стебля в эллипсное:

- 1 – серповидное лезвие комбинированного ножа; 2 – стебель;
3 – армирующие прожилки; 4 – противорежущая пластина

Далее процесс может протекать по двум вариантам.

Вариант первый. Лезвие отрезает целый кусок заданной длины (этап 3). В этом случае поверхность среза фактически представляет собой сечение цилиндра, которым является стебель корма диаметром d . Заменяем режущий инструмент цилиндром с диаметром D . Заметим $D \gg d$. Возможны различные сочетания стебля и поверхности резания в зависимости от угла подачи и расстояния между осями цилиндра. Варианты сводятся к двум принципиально отличающимся.

1. Ось стебля близка к оси поверхности резания. В этом случае (учитывая, что $D \gg d$), эллиптичность поверхности среза практически не заметна, и он, фактически, представляет собой плоскость. Схема представлена на рисунке 2.8.

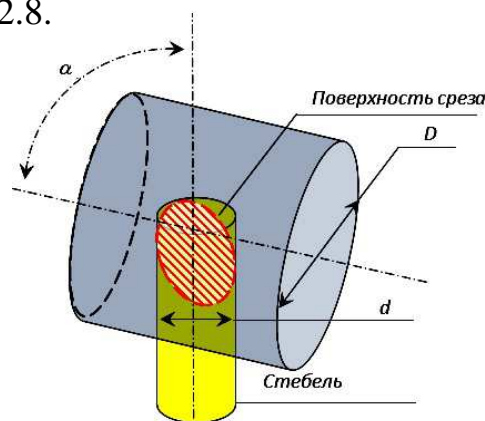


Рисунок 2.8 – Схема измельчения

Тогда задача тривиально сводится к поиску усеченного плоскостью цилиндра, приведенного на рисунке 2.9 [41, 44, 91, 113]:

$$V = S_{осн} h_{ср}, \text{ м}^3, \quad (2.18)$$

где $h_{ср}$ - средняя высота цилиндра.

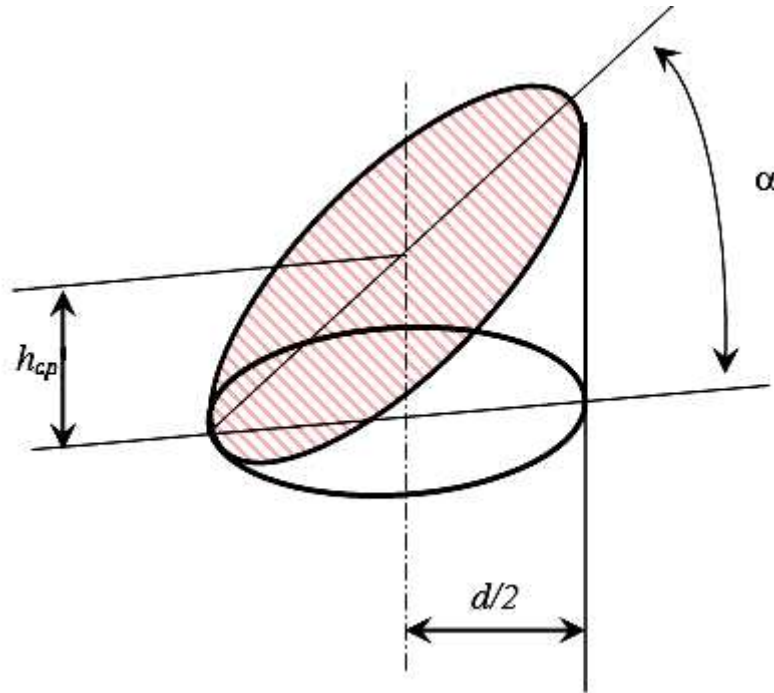


Рисунок 2.9 – Схема отсекаемой частицы стебля

Имеем [52, 54, 59, 63, 66]:

$$h_{ср} = \frac{d \sin \alpha}{2}, \quad (2.19)$$

$$S_{осн} = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2.20)$$

Тогда, объем отсекаемой части составит:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \frac{d \sin \alpha}{2} = \frac{\pi d^3}{8} \sin \alpha. \quad (2.21)$$

2. Если оси стебля и поверхности резания существенно разнесены (на расстояние δ), то цилиндричностью поверхности среза пренебречь нельзя.

Определим уравнение поверхности среза. Ось поверхности резания (рисунок 2.10) параллельна оси x и удалена от нее на d . Заметим, что в

процессе резания под действием системы сил резания, имеет место боковое смещение стебля (определим его параметром λ [1/м]). Данный параметр определяется из эксперимента и зависит от ряда факторов: заточки режущей кромки, прочности стебля, влажности, числа оборотов режущего инструмента и многих других. Поэтому поверхность резания среди всех вариантов цилиндрической поверхности наиболее адекватно описывается параболическим цилиндром.

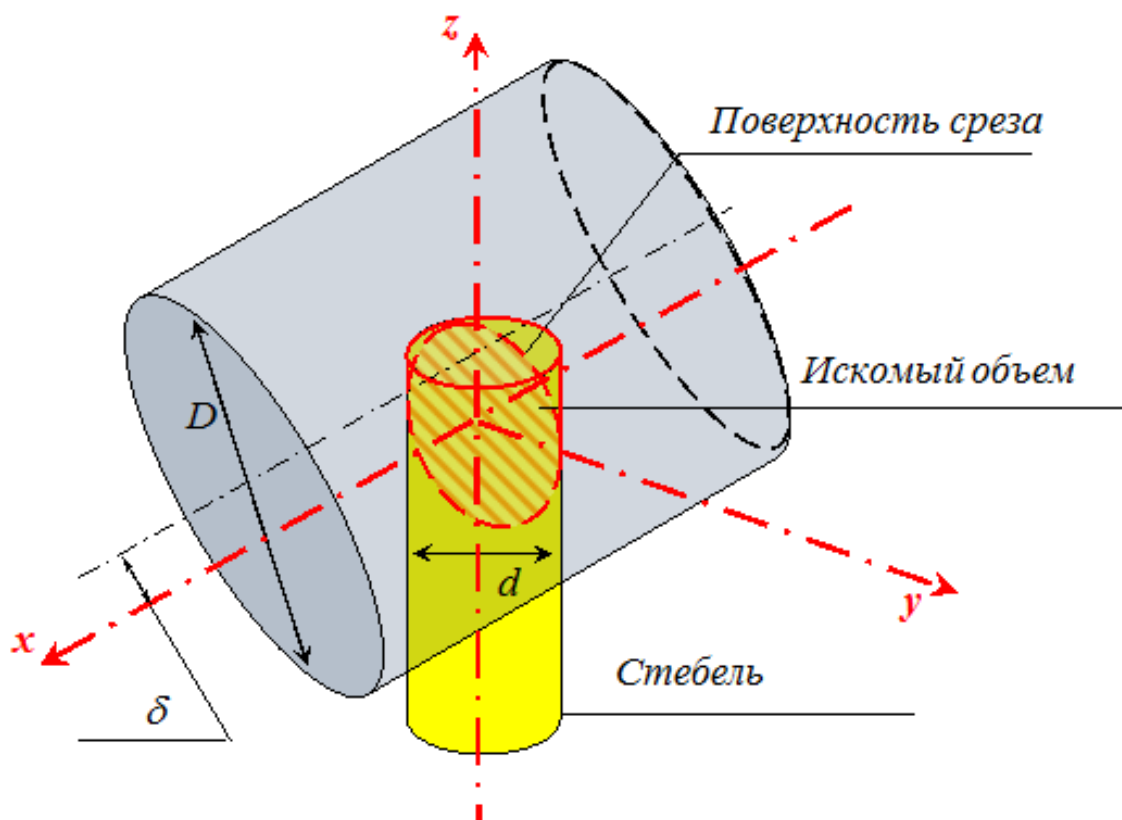


Рисунок 2.10 – К определению уравнения поверхности среза

Тогда уравнение поверхности резания имеет вид [52, 54, 59, 63, 66-68]:

$$z = \lambda(y - \delta)^2. \quad (2.22)$$

Уравнение поверхности стебля имеет вид:

$$x^2 + y^2 = \frac{d^2}{4}. \quad (2.23)$$

Объем ищем в цилиндрических координатах. Учитывая, что $y = \rho \sin \varphi$, запишем интегральные зависимости.

$$\begin{aligned}
V_1 &= 16 \int_0^{\frac{\pi}{4}} d\varphi \int_0^{\frac{d}{4}} \rho d\rho \int_0^{\lambda(\rho \sin \varphi - \delta)^2} dz = 8\lambda \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{\frac{d}{2}} \rho(\rho \sin \varphi - \delta)^2 d\rho = 16\lambda \int_0^{\frac{\pi}{4}} d\varphi \int_0^{\frac{d}{2}} (\rho^3 \sin^2 \varphi - \\
&- 2\rho^2 \delta \sin \varphi + \delta^2) d\rho = 16\lambda \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left[\frac{\rho^4 \sin^2 \varphi}{4} - \frac{2\rho^3 \delta \sin \varphi}{3} + \delta^2 \rho \right]_0^{\frac{d}{2}} d\varphi = \\
&= 16\lambda \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left[\frac{d^4 \sin^2 \varphi}{64} - \frac{2d^3 \delta \sin \varphi}{12} + \frac{\delta^2 d}{2} \right] d\varphi = 8\lambda \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left[\frac{d^4 \sin^2 \varphi}{32} - \frac{2d^3 \delta \sin \varphi}{6} + \right. \\
&+ \left. \delta^2 d \right] d\varphi = 8\lambda \int_0^{\frac{\pi}{4}} \left[\frac{\cos 2\varphi + 1}{2} \frac{d^4}{32} - \frac{d^3 \delta \sin \varphi}{6} + \delta^2 d \right] d\varphi = 8\lambda \left[\left(\frac{\sin 2\varphi + 2\varphi}{4} \frac{d^4}{32} + \right. \right. \\
&+ \left. \left. \frac{d^3 \delta \cos \varphi}{6} + \delta^2 d \varphi \right) \right]_0^{\frac{\pi}{4}} = 8\lambda \left(\frac{\sin \frac{\pi}{2} - \pi}{4} \frac{d^4}{32} + \frac{d^3 \delta \cos \frac{\pi}{4} - d^3 \delta \cos 0}{6} + \frac{\delta^2 d \pi}{4} \right) = \\
&= 8\lambda \left(\frac{1 - \pi}{4} \frac{d^4}{32} + \frac{d^3 \delta (2 - \sqrt{2})}{12} + \frac{\delta^2 d \pi}{4} \right) = \lambda \left(\frac{1 - \pi}{16} d^4 + \frac{d^3 \delta (4 - 2\sqrt{2})}{3} + 2\delta^2 d \pi \right)
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Окончательно получим искомый объем:

$$V_1 = \lambda \left(\frac{1 - \pi}{16} d^4 + \frac{d^3 \delta (4 - 2\sqrt{2})}{3} + 2\delta^2 d \pi \right). \tag{2.25}$$

Вариант второй. В процессе измельчения происходит расщепление частицы. В данном, наиболее характерном, случае этап 3 приобретает вид, приведенный на рисунке 2.11.

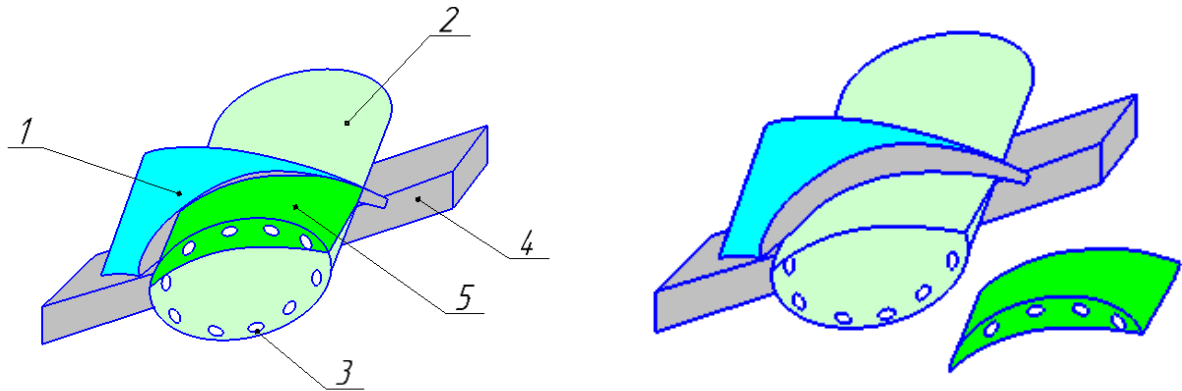


Рисунок 2.11 – К обоснованию процесса измельчения в наиболее характерном случае: 1 – серповидное лезвие комбинированного ножа; 2 – стебель; 3 – армирующие прожилки; 4 – противорежущая пластина; 5 – оторвавшаяся часть осекаемой частицы

Для дальнейших теоретических исследований целесообразно воспользоваться выражениями (2.9-2.14).

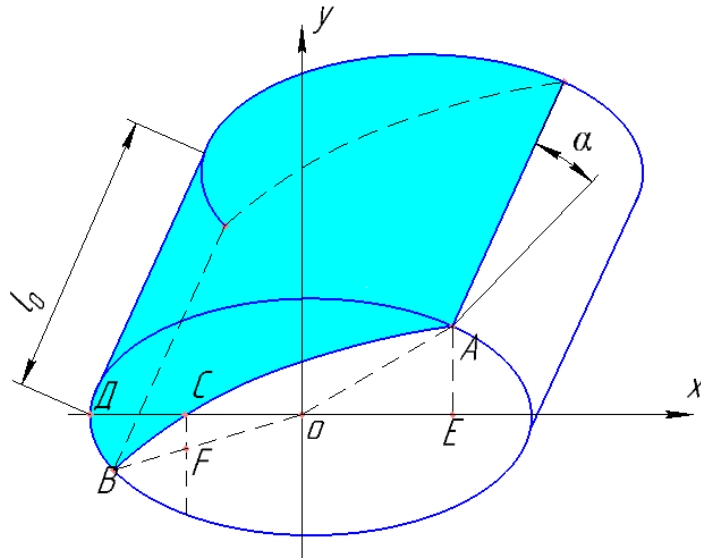


Рисунок 2.12 – Схема отсекаемого куска стебля

Длина срезаемой части (высота криволинейного цилиндра) определяется формулой:

$$l = l_0 + x \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.26)$$

где α - угол, под которым стебель поступает на резание, град.

$$\begin{aligned}
 V_2 = & \int_{X_0}^{X_A} l(x) \cdot f(x) dx + \int_{X_0}^{X_B} l(x) \cdot f(x) dx - \int_{\varphi_A}^{\varphi_C} l(\varphi) \rho^2(\varphi) d\varphi - l(x) S_{\Delta OAE} + \\
 & \left(\int_{\varphi_C}^{\varphi_B} l(\varphi) \rho^2(\varphi) d\varphi - l(x) S_{\Delta OCF} \right) = \frac{b}{a} \int_{-a}^{X_A} (l_0 + x \operatorname{tg} \alpha) \sqrt{a^2 - x^2} dx + \\
 & \frac{b}{a} \int_{-a}^{X_B} (l_0 + x \operatorname{tg} \alpha) \sqrt{a^2 - x^2} dx - \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} (l_0 + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha) (\varphi_0 + k\varphi)^2 d\varphi - \\
 & - \frac{(l_0 + x_A \operatorname{tg} \alpha) x_A y_A}{2} - \frac{(l_0 + x_C \operatorname{tg} \alpha) (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi_B}{2} = \frac{bl_0}{a} (X_A + a + \\
 & + X_B + a) - \frac{2(2a^2 - X_B^2 - X_A^2)}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} (l_0 \varphi_0 + 2l_0 \varphi_0 k \varphi + l_0 k^2 \varphi^2 + \\
 & + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_0 + 2(X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_0 k \varphi + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha k^2 \varphi^2) d\varphi - \\
 & - \frac{(l_0 + x_A \operatorname{tg} \alpha) x_A y_A + (l_0 + x_C \operatorname{tg} \alpha) (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi_B}{2} = \frac{bl_0}{a} (X_A + X_B 2a) - \\
 & \frac{2(2a^2 - X_B^2 - X_A^2)}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - (l_0 (\varphi_B - \varphi_A) + 2l_0 \varphi_0 k (\varphi_B^2 - \varphi_A^2) + l_0 k^2 (\varphi_B^3 - \varphi_A^3)) + \\
 & + (X_A - X_B) \operatorname{tg} \alpha \varphi_0 (\varphi_B - \varphi_A) + 2(X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_0 k (\varphi_B^2 - \varphi_A^2) + \\
 & + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha k^2 (\varphi_B^3 - \varphi_A^3)). \quad (2.27)
 \end{aligned}$$

Проведя окончательные преобразования, получим:

$$V_2 = \frac{bl_0}{a}(X_A + X_B - 2a) - \frac{2(2a^2 - X_B^2 - X_A^2)}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - (l_0 + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_0) \cdot (\varphi_B - \varphi_A) + \quad (2.28)$$

$$+ (2\varphi_0 l_0 + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_0) \cdot k \cdot (\varphi_B^2 - \varphi_A^2) + (l_0 + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot k^3 (\varphi_B^3 - \varphi_A^3).$$

При расчете объем эллиптического цилиндра целесообразно считать с использованием декартовой системы координат, а площадь, отсекаемую спиралью – в полярной системе (из соображений удобства интегрирования). Поэтому координаты отдельных точек следует взять одновременно в обеих системах. Сведение их к одной сильно усложнит конечную формулу. Поэтому значения координат целесообразно рассчитывать отдельно, исходя из элементарных формул перевода систем и уравнения эллипса.

$$\varphi_A = \operatorname{arctg} \left(\frac{Y_A}{X_B} \right). \quad (2.29)$$

$$Y_A = \left(\frac{b}{a} \right) \cdot (a^2 - X_A^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.30)$$

$$\varphi_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{Y_B}{X_B} \right). \quad (2.31)$$

$$Y_B = \left(\frac{b}{a} \right) \cdot (a^2 - X_B^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.32)$$

где φ_0 – угол между стеблем и режущим инструментом;

a и b – полуоси эллипса;

X_A и X_B – координаты точек исходного условия.

В соответствии с теорией, приведённой в [94, с 205], рис. 2.2. и выражение (2.1), длина резки составит:

$$l_0 = \frac{v_{cl}}{n_{\sigma} \cdot K_{III}}, \text{ м}, \quad (2.33)$$

где v_{cl} – скорость подачи слоя на измельчение, м/с (рисунок 2.13);

l_0 – длина стебля от кромки до точки касания режущего инструмента.

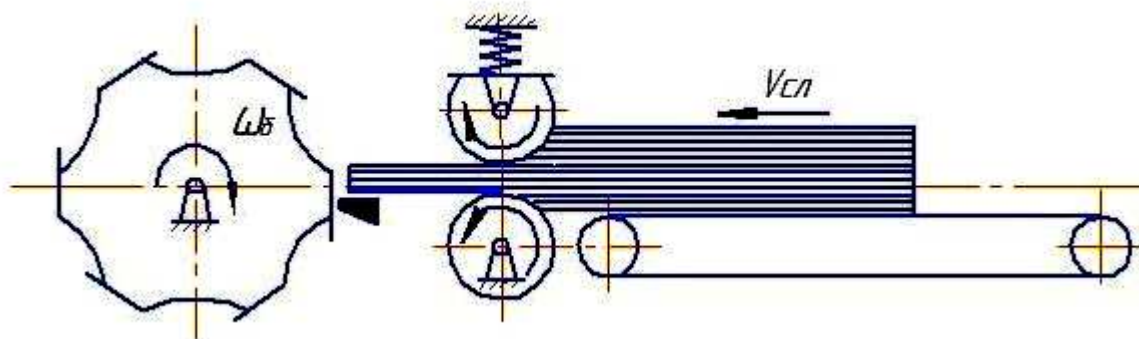


Рисунок 2.13 – Схема подачи слоя на измельчение

В соответствии с теорией, приведённой в [20, 37, 38, 68, 94]:

$$\omega_{\delta} = v_{сл} \frac{\theta}{l_0}, \text{ с}^{-1}, \quad (2.34)$$

где ω_{δ} – угловая скорость рабочего органа, с^{-1} ;

θ – центральный угол между ножами.

Зная объем отсекаемых частиц, производительность измельчителя определим из выражения:

$$W_{wv} = \rho_c \cdot K_{\text{III}} \frac{\beta_1}{\beta_2} \cdot \frac{v_{сл} \cdot \theta}{l_0 \cdot 2\pi} \cdot \psi \cdot \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{l} \frac{bl_0}{a} (X_A + X_B 2a) - \frac{2(2a^2 - X_B^2 - X_A^2)}{3 \cdot \text{tg} \alpha} \\ - (l_0 + (X_A - X_B) \cdot \text{tg} \alpha \varphi_0) \cdot (\varphi_B - \varphi_A) + \\ + (2\varphi_0 l_0 + (X_A - X_B) \cdot \text{tg} \alpha \varphi_0) \cdot k \cdot (\varphi_B^2 - \varphi_A^2) + \\ + (l_0 + (X_A - X_B) \cdot \text{tg} \alpha) \cdot k^3 (\varphi_B^3 - \varphi_A^3) \end{array} \right), \text{ кг/с}, \quad (2.35)$$

где ρ_c – объёмная масса корма, уплотненная питающим аппаратом, кг/м^3
 (ρ_c принимают: для соломы – 54 - 100 кг/м^3 ; для стебельчатых кормов – 90 - 120 кг/м^3 ; силоса – 405 кг/м^3 ; зелёной массы – 234 кг/м^3);

β_1 – угол установки ножей первого яруса до удара, град;

β_2 – угол установки ножей второго яруса после удара, град;

ψ – коэффициент, учитывающий снижение пропускной способности барабанного измельчителя из-за несовершенства питающего аппарата ($\psi = 0,5 - 0,7$).

Изменение угла установки ножей второго яруса после удара определяются стандартными методами теоретической механики (например, через изменение направления импульса тела).

На основании (2.35) построена теоретическая зависимость производительности нового измельчителя от частоты вращения его рабочего органа (рисунок 2.14).

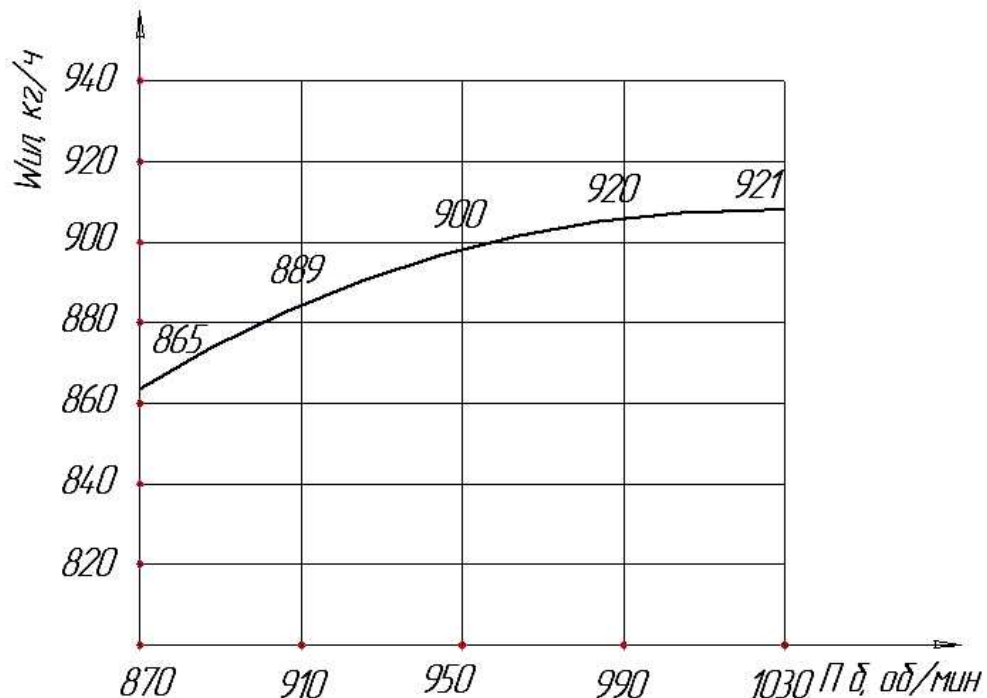


Рисунок 2.14 – Теоретическая зависимость производительности нового измельчителя от частоты вращения его рабочего органа

Анализ представленной теоретической зависимости производительности нового измельчителя от частоты вращения его рабочего органа показал, что максимальная производительность достигается в интервале частот вращения рабочего органа 950-1030 об/мин. При этом максимальная теоретическая производительность измельчителя

предлагаемой конструкции достигает 921 кг/ч. Также видно, что после 990 об/мин производительность существенно не изменяется. Это указывает на то, что второй ярус лезвий на комбинированных ножах начинает работать неэффективно из-за увеличенного угла установки второго яруса лезвий после удара первым ярусом о стебель. Увеличение угла установки второго яруса лезвий приводит к тому, что лезвия ножей перестают воздействовать на стебель режущей кромкой и начинают перебивать стебель плоскостью, подобно молоткам. В таких условиях принцип скользящего резания становится неосуществим и эффективность процесса снижается. Увеличение частоты вращения рабочего органа выше 1030 об/мин нецелесообразно, поскольку ножи второго яруса будут работать неэффективно, как следствие, измельчающий аппарат, не справляясь с подачей, начнет забиваться и производительность снизится. Влияние угла установки второго яруса лезвий на эффективность процесса измельчения требует дальнейших исследований.

2.3. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение

В своей работе «Силосоуборочные комбайны: теория и расчет» профессор Н.Е. Резник для расчета мощности затраченной на измельчение стеблей ножевым барабаном предложил выражение [93]:

$$N_{\sigma} = q_y \cdot \frac{S_c \cdot K_{\text{ПН}} \cdot n_{\sigma}}{60}, \text{ Вт.} \quad (2.36)$$

где q_y – удельное давление ножа, Н/м;

S_c – площадь разреза одним лезвием, м²;

n_{σ} – частота вращения барабана, об/мин.

Схема сил, действующих на стебель, приведена на рисунке 2.15.

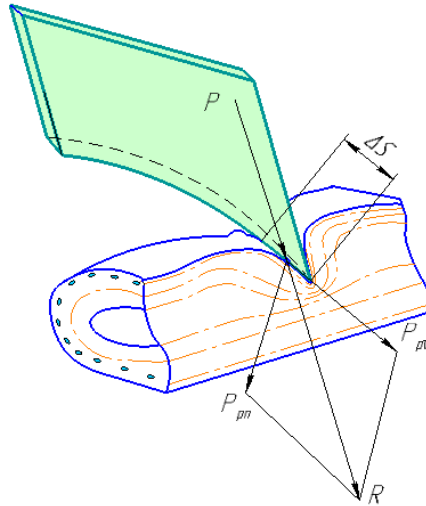


Рисунок 2.15 – К определению удельного давления ножа

Удельным давлением называется отношение нормально действующей силы P_{pn} к загруженной части лезвия ножа ΔS [59, 96]:

$$q_y = \frac{P_{pn}}{\Delta S}, \text{ Вт.} \quad (2.37)$$

При наличии боковой силы P_{pt} и скользящего движения ножа величина потребного нормального давления уменьшается [20, 37, 59, 96].

Объединяя (2.36) и (2.37), получим [20, 37, 59, 96]:

$$N_{\sigma} = \frac{P_{pn} \cdot S_c \cdot K_{\text{ПН}} \cdot n_{\sigma}}{\Delta S \cdot 60}, \text{ Вт.} \quad (2.38)$$

Объединяя (2.16) и (2.38), получим:

$$N_{\sigma} = \left(\begin{array}{l} \frac{b}{2a} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \\ + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \\ - 1,5ab\pi + 0,5x_A y_A (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi \end{array} \right) \cdot \frac{P_{pn} \cdot K_{\text{ПН}} \cdot n_{\sigma}}{\Delta S \cdot 60}, \text{ Вт.} \quad (2.39)$$

Поскольку рабочий процесс резания материала лезвием состоит из двух этапов: предварительного уплотнения и резания (см. рис. 2.3), тогда:

$$P_{pn} = P_{pn1} + P_{pn2} + P_{pn3} + P_{pn4}, \text{ Н.} \quad (2.40)$$

где P_{pn1} – сила, создающая упругие деформации армирующих прожилок стебля, Н;

P_{pn2} – сила, создающая пластические деформации армирующих прожилков стебля, Н;

P_{pn3} – сила, создающая упругие деформации основного материала стебля, Н;

P_{pn4} – сила, создающая пластические деформации основного материала стебля, Н.

Следовательно, сила, разрушающая армирующие прожилки, равна

$$P'_{pn} = P_{pn1} + P_{pn2}, \text{ Н.} \quad (2.41)$$

Сила, разрушающая основной материал

$$P''_{pn} = P_{pn3} + P_{pn4}, \text{ Н.} \quad (2.42)$$

Тогда:

$$P_{pn} = P'_{pn} + P''_{pn}, \text{ Н.} \quad (2.43)$$

При нормальном действии ножа на стебель в зоне разрушения последнего возникают нормальные напряжения. В поперечных сечениях стержня возникают нормальные напряжения, которые, согласно гипотезе плоских поперечных сечений, равномерно распределены по всей площади сечения и равны отношению силы к площади поперечного сечения [26, 66]:

$$\sigma = \frac{P'_{pn}}{\Sigma S_{II}} + \frac{P''_{pn}}{\Sigma S_o}, \text{ Па,} \quad (2.44)$$

где ΣS_{II} – общая площадь поперечного сечения армирующих прожилков стебля, м²;

ΣS_o – общая площадь поперечного сечения основного материала стебля, м².

Для дальнейших теоретических исследований необходимо представить модель строения стебля. Как уже было сказано ранее (см. раздел 1, с. 20), наиболее прочной арматурной тканью является склеренхима (рисунок 2.16, 2.17).

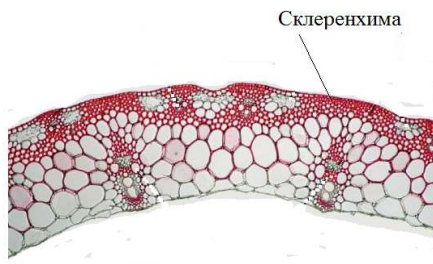


Рисунок 2.16 – Общий план строения стебля соломины злака

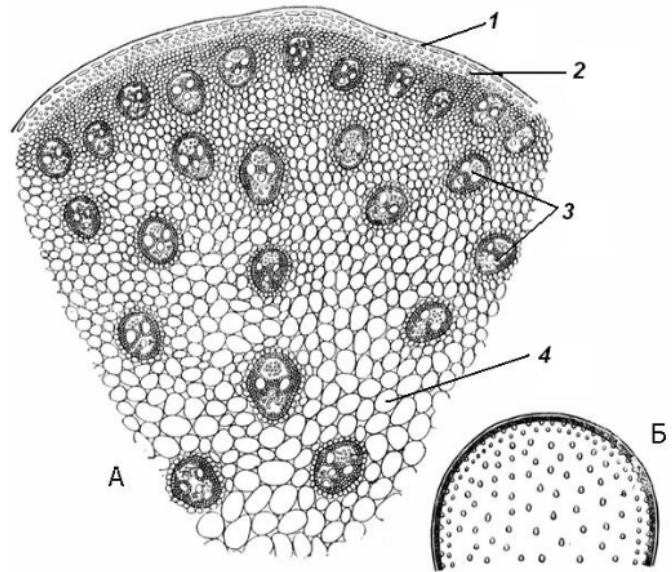


Рисунок 2.17 – Строение стебля кукурузы:
А – поперечный срез; Б – общая схема;
1 – эпидерма; 2 – склеренхима; 3 – закрытые коллатеральные пучки;
4 – основная паренхима

Предлагается, сделав предположение, рассматривать стебель как цилиндр, выполненный из однородного материала, периферия которого армирована более прочными прожилками (рисунок 2.18).

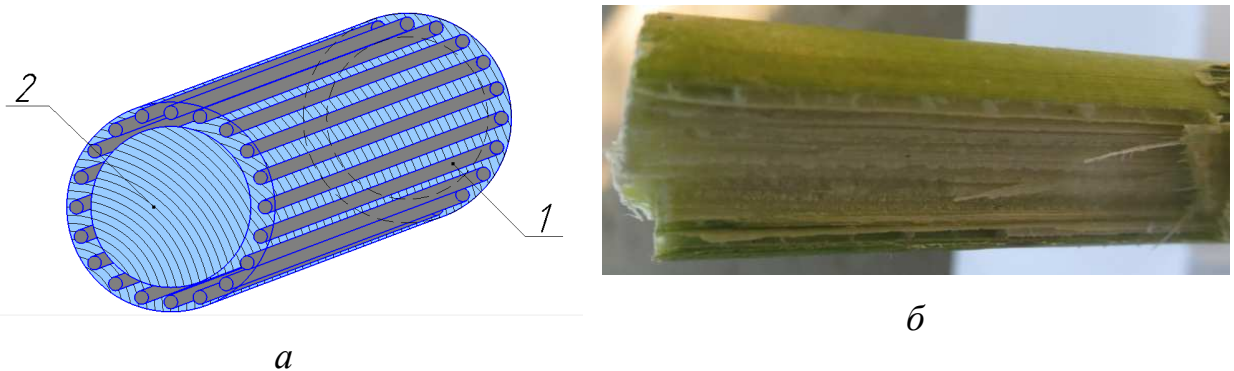


Рисунок 2.18 – К обоснованию модели строения стебля:

a – схема; 1 – армирующие прожилки;
2 – основной материал; *б* – фото армирующих прожилков в стебле кукурузы

Абсолютная деформация выражает абсолютное изменение какого-либо линейного или углового размера, площади сечения или участка граничной поверхности элемента, выделенного в деформируемом теле, или всего тела [24, 83, 93, 98, 99, 118].

Абсолютную деформацию вычисляют по формуле [24, 83, 93, 118]:

$$\Delta h_i = \frac{P_{pn} \cdot h_i}{E \cdot S_c}, \text{ м.} \quad (2.45)$$

где E – модуль упругости, МПа.

Отсюда, сила, необходимая для разрушения армирующих прожилок:

$$P'_{pn} = \frac{\Delta h_i' \cdot E' \cdot \Sigma S_{II}}{h_i'}, \text{ Н,} \quad (2.46)$$

где h_i' – эквивалентная толщина измельчаемого слоя прожилок стебля, м;

$\Delta h_i'$ – абсолютная деформация измельчаемого слоя прожилок, вызывающая появление разреза, м;

E' – модуль упругости материала прожилок, МПа.

Сила, необходимая для разрушения основного материала:

$$P''_{pn} = \frac{\Delta h_i'' \cdot E'' \cdot \Sigma S_o}{h_i''}, \text{ Н,} \quad (2.47)$$

где h_i'' – толщина измельчаемого слоя основного материала стебля, м;

$\Delta h_i''$ – абсолютная деформация основного материала, вызывающая появление разреза м;

E'' – модуль упругости основного материала, МПа.

Тогда:

$$P_{pn} = \frac{\Delta h_i' \cdot E' \cdot \Sigma S_{II}}{h_i'} + \frac{\Delta h_i'' \cdot E'' \cdot \Sigma S_o}{h_i''}, \text{ Н.} \quad (2.48)$$

Сделав второе предположение, можно заключить, что абсолютную деформацию измельчаемого слоя стебля, вызывающую появление разреза можно определить согласно известной теории, предложенной В.П. Горячкиным из выражения пути смятия [37, 38, 115]:

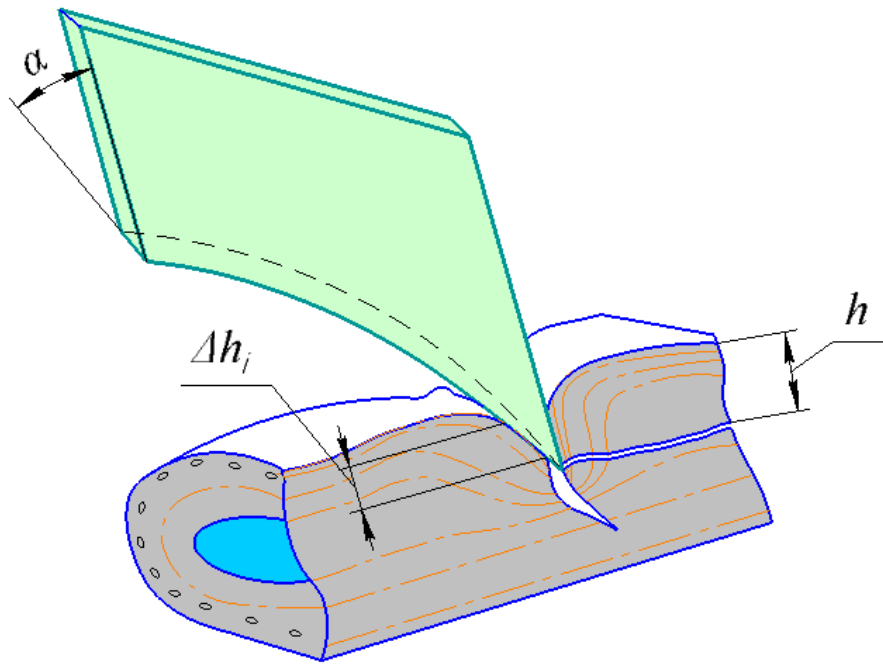


Рисунок 2.19 – Схема внедрения клина в измельчаемый материал

$$\Delta h_i = h \frac{\cos \varphi_1 \cdot \sin^2 \left[\left(90^\circ - \varphi_1 \right) / 2 \right] \cos \left[\left(\varphi_1 + \varphi_2 - \alpha \right) / 2 \right]}{\cos^3 \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha}{2} \right)}, \text{ м}, \quad (2.49)$$

где h – толщина стружки, м;

α – угол резания, градус;

φ_1 – угол трения материала по граням клина, градус;

φ_2 – угол трения в плоскости скалывания, градус.

Объединяя (2.39, и 2.48) и с учетом (2.49) получим выражение:

$$N_{\phi} = \frac{K_{\text{пн}} \cdot n_{\phi}}{\Delta S \cdot 60} \cdot \left(\frac{\Delta h_i' \cdot E' \cdot \Sigma S_{\text{п}}}{h_i'} + \frac{\Delta h_i'' \cdot E'' \cdot \Sigma S_o}{h_i''} \right) \times \left(\begin{array}{l} \frac{b}{2a} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \\ + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \\ - 1,5ab\pi + 0,5x_A y_A (\varphi_o + k\pi)^2 \text{tg} \varphi \end{array} \right), \text{ Вт.} \quad (2.50)$$

Выражение (2.50) не учитывает силы трения, действующие на боковые грани F_1 и F_2 , и силу трения F_3 , действующую на лезвие (рисунок 2.20).

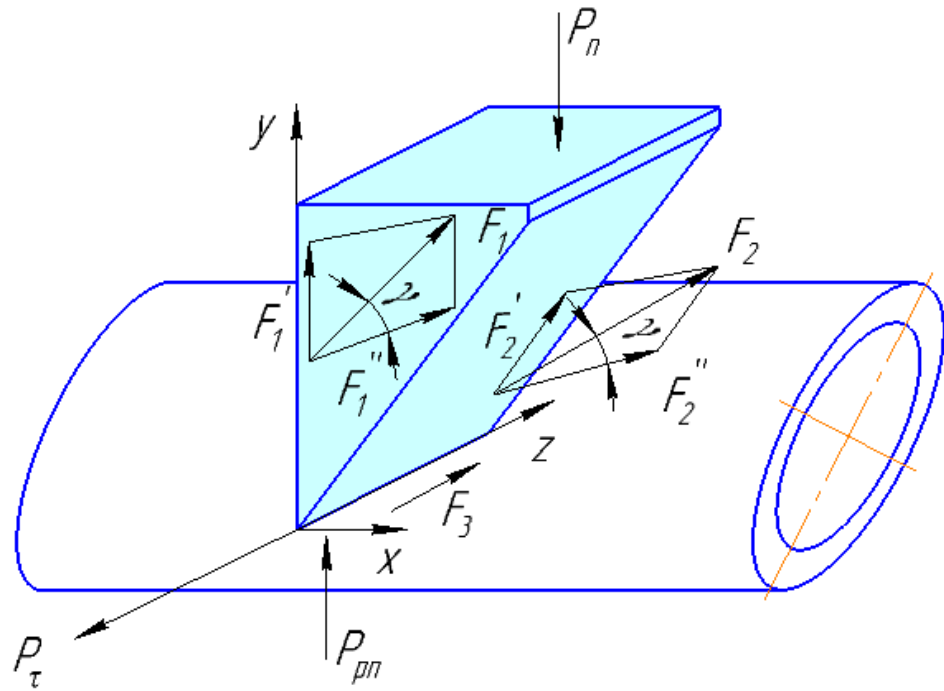


Рисунок 2.20 – Схема сил, действующих на лезвие комбинированного ножа

Следовательно,

$$N_{\delta} = \frac{K_{\text{пш}} \cdot n_{\delta}}{\Delta S \cdot 60} \cdot \left(\frac{\Delta h_i' \cdot E' \cdot \Sigma S_{\text{II}}}{h_i'} + \frac{\Delta h_i'' \cdot E'' \cdot \Sigma S_o}{h_i''} + \sum_{i=1}^n F_i \right) \times$$

$$\left(\frac{b}{2a} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \right. \quad , \text{Вт. (2.51)}$$

$$\times \left. + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \right.$$

$$\left. - 1,5ab\pi + 0,5x_A y_A (\varphi_o + k\pi)^2 \text{tg} \varphi \right)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = F_1 + F_2 + F_3, \text{ Н.} \quad (2.52)$$

где F_1 – абсолютное значение силы трения материала о тыльную часть лезвия, Н;

F_2 – абсолютное значение силы трения материала о вертикальную часть лезвия, Н;

F_3 – абсолютное значение силы трения материала о режущую кромку лезвия, Н.

На основании (2.51) построена теоретическая зависимость затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов от частоты вращения его рабочего органа (рисунок 2.21).

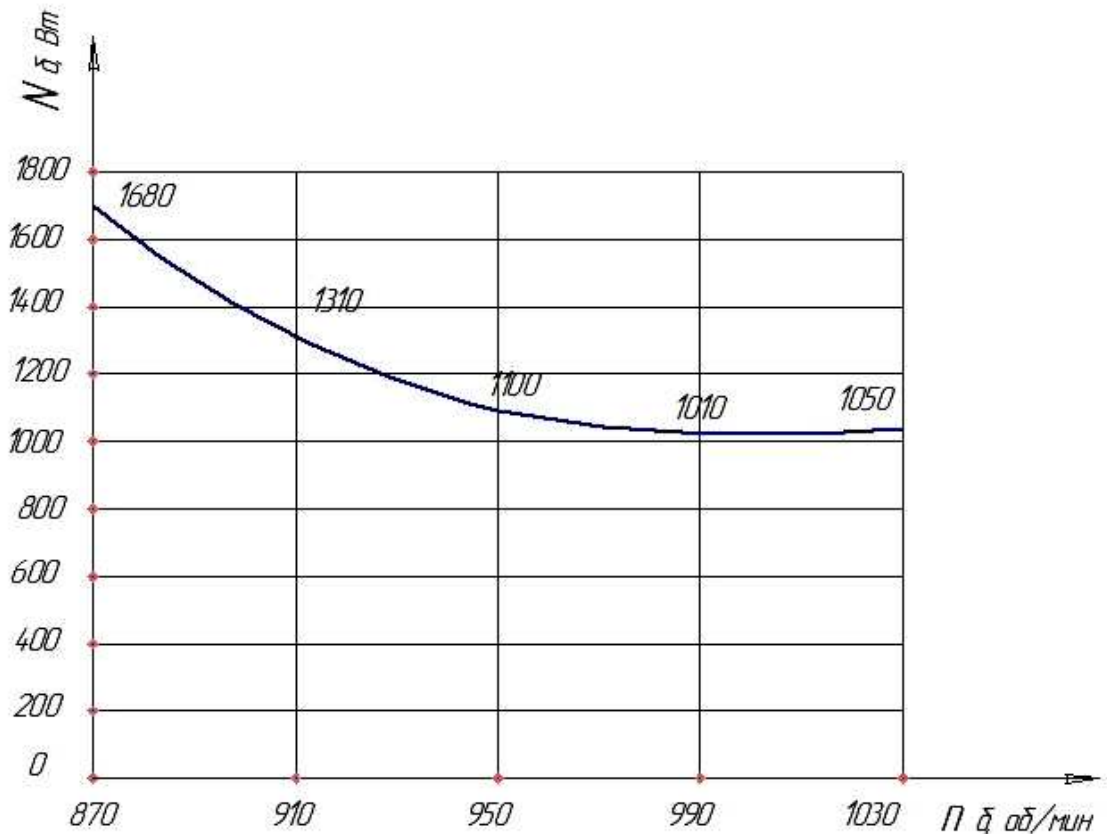


Рисунок 2.21 – Теоретическая зависимость затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов от частоты вращения его рабочего органа

Анализируя графическую зависимость (см. рис. 2.21) видно, что рациональным является интервал частот вращения рабочего органа 950-1030 об/мин. В данном рациональном интервале функция затрат мощности достигает своего минимума (нижний экстремум функции) при частоте вращения рабочего органа 990 об/мин. При уменьшении или увеличении частоты вращения рабочего органа относительно точки нижнего экстремума значение мощности начинает плавно возрастать, что указывает

на начало преобладания рубки над скользящим резанием, вследствие чего нерационально используется рабочая часть лезвия (уменьшается его загруженная часть) и увеличиваются абсолютные значения сил трения.

Необходимую мощность электродвигателя измельчителя можно определить по формуле [23, 37, 115, 120]:

$$N_{II} = K_{II} \cdot (N_{X-X} + N_{\delta}) / \eta, \text{ кВт}, \quad (2.51)$$

где K_{II} – коэффициент преодоления инерции при пуске, $K_{II} = 1,05 \dots 1,2$ [93, 97-99, 104, 105, 107, 108, 111, 125, 127];

N_{X-X} – мощность, потребная на холостой ход, кВт;

η – К.П.Д. механизма привода, для клиноременной передачи $\eta = 0,95$ [93, 97-99, 104, 105].

Соппротивление холостого хода рабочего органа обусловливается трением оси ротора в подшипниках и сопротивлением воздуха.

Мощность, потребная на холостой ход рабочего органа, по аналогии может быть определена из выражения [23, 37, 115, 120]:

$$N_{X-X} = A \cdot \omega + B \cdot \omega^3, \text{ кВт}, \quad (2.52)$$

где $A \cdot \omega$ – мощность, необходимая для преодоления трения в опорах, кВт;

$B \cdot \omega^3$ – мощность, необходимая для преодоления сопротивления ветра, кВт.

На основании данных приведённых в [23, 37, 115, 120], примем

$$A = 0,4 \cdot 10^{-3},$$

$$B = 0,23 \cdot 10^{-6}.$$

Как видно из графической зависимости (рис. 2.21) мощность, потребная на измельчение стеблей при производительности 920 кг/ч составляет 1,01 кВт. При данной частоте вращения рабочего органа мощность, потребная на холостой ход рабочего органа составит 0,331 кВт. Следовательно, на основании выражения (2.51), необходимая мощность электродвигателя измельчителя при заданной производительности составит 1,61 кВт.

Зная производительность нового измельчителя и затраты мощности на измельчение, можно определить удельную энергоёмкость процесса. Энергоёмкость является показателем эффективности процесса и ее теоретические значения целесообразно сравнивать с экспериментальными данными для определения адекватности теории. Теоретическая зависимость удельной энергоёмкости процесса измельчения стебельчатых кормов от частоты вращения его рабочего органа приведена на рисунке 2.22. Удельная энергоёмкость построена на основании зависимостей, приведенных на рисунках 2.14 и 2.21 как отношение мощности, потребной на измельчение стебельчатых кормов к производительности нового измельчителя.

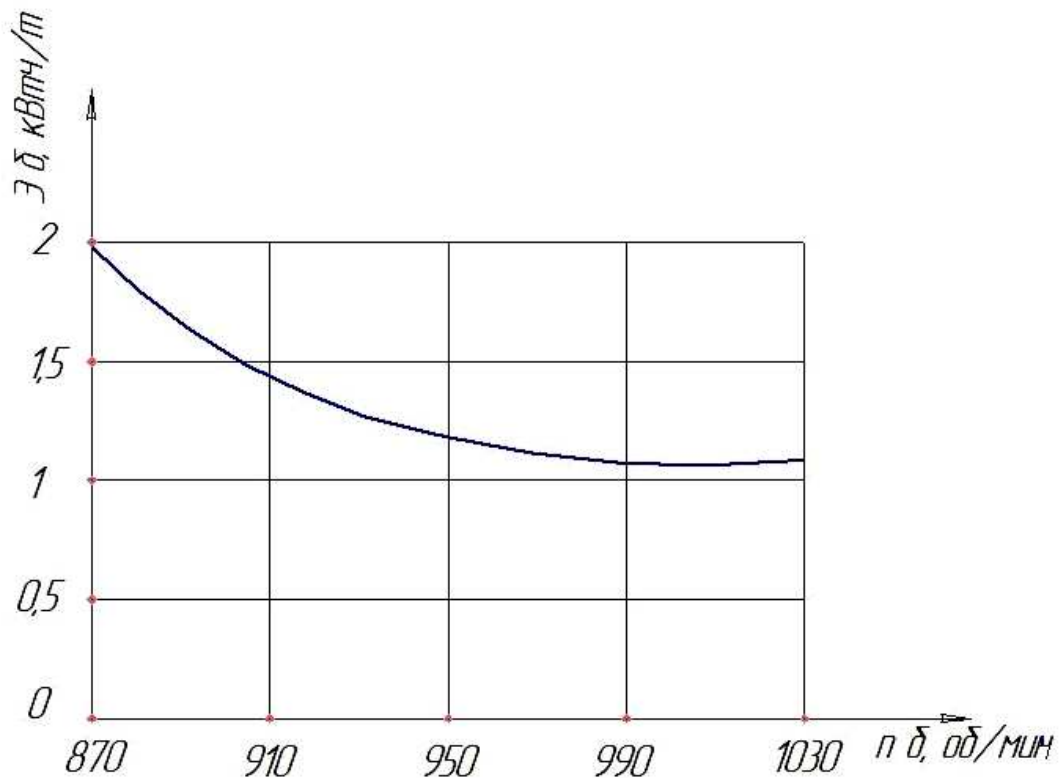


Рисунок 2.22 – Теоретическая зависимость удельной энергоёмкости процесса измельчения стебельчатых кормов от частоты вращения его рабочего органа

Анализируя графические зависимости 2.22 видно, что в рациональном интервале частот вращения рабочего органа 950-1030 об/мин удельная энергоёмкость минимальная и составляет 1,1-1,21 кВтч/т. Удельная

энергоёмкость минимальная, поскольку в рациональном интервале частот вращения рабочего органа производительность нового измельчителя максимальна, а затраты мощности наименьшие. Данный интервал частот работы измельчителя необходимо исследовать экспериментально, для этого целесообразно разработать программу и методику экспериментальных исследований и провести эксперимент.

Выводы

1. Исследования доказывают возможность повышения эффективности процесса измельчения грубых кормов с прочным стеблем (например, кукуруза, сахарное сорго, сорго-суданковый гибрид и т.д.) путем применения рабочего органа, одновременно обеспечивающего ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами.

2. Процесс измельчения стеблей предложенным рабочим органом представляет собой отсечение частиц определенной длины с их одновременным расщеплением на части. Закономерности данных явлений определены в результате новых теоретических исследований, на основании которых разработаны математические модели, определяющие производительность и затраты мощности на измельчение, впервые учитывающие эффект расщепления отсеченных частиц стебля на части при прохождении рабочего органа сквозь измельчаемый слой стеблей.

3. Предложенные математические модели учитывают строение измельчаемых стеблей, изменение формы их поперечного сечения при контакте с лезвиями и кривизну режущей кромки поперечных лезвий комбинированных ножей, что позволяет более точно теоретически определить нормально действующую силу лезвий ножей и рассчитать

значение ее величины, необходимой на разрушение армирующих прожилок и основного материала стебля.

4. Новые математические модели показали, что максимальная теоретическая производительность измельчителя предлагаемой конструкции 909-921 кг/ч достигается в диапазоне частот 950–1030 об/мин., однако превышение частоты вращения рабочего органа выше 990 об/мин. нецелесообразно, поскольку второй ярус лезвий на комбинированных ножах начинает работать неэффективно из-за увеличенного угла установки второго яруса лезвий после удара первым ярусом о стебель. Кроме того, в диапазоне частот вращения рабочего органа 950-1030 об/мин обеспечивается режим минимальных затрат мощности на измельчение, которые составляют 1,01-1,1 кВт.

5. В рациональном режиме измельчения мощность, потребная на холостой ход рабочего органа, составит 0,331 кВт, необходимая мощность электродвигателя, с учетом коэффициента преодоления инерции при пуске, составит 1,61 кВт, а удельная энергоёмкость процесса измельчения минимальная и составляет 1,1-1,21 кВтч/т.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА

3.1. Программа экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с целью проверки адекватности новых теоретических предпосылок, приведенных во втором разделе данной диссертационной работы.

Программа и методика экспериментальных исследований разработана с использованием результатов теоретико-экспериментальных исследований следующих ученых: В.П. Горячкина, П.М. Василенко, С.В. Мельникова, Е.И. Резника, Г.М. Кукты, Н.В. Брагинца, И.И. Ревенко, В.В. Шацкого, Г.И. Бремера, Л.Ф. Бабицкого, В.А. Дидура, Л.Н. Тищенко, С.И. Рустамова, С.Ф. Вольвака, Д.Н. Бахарева, И.Б. Лысенко, С.И. Назарова, Е.Г. Пехура и др. [1, 6, 17, 20-22, 25, 28-30, 37, 38, 45, 46, 50, 56, 62, 65, 69, 71, 76, 82, 88, 90, 92, 94, 96, 99, 101, 103, 109, 110, 112, 116, 117, 124, 126, 129-132, 134].

Для системного проведения экспериментов разработана программа исследований, в соответствии с которой необходимо:

1. Настроить, тарировать и тестировать контрольно-измерительную и регистрирующую аппаратуру.

2. Изучить механико-технологические свойства измельчаемых кормов.

3. В системе однофакторных экспериментов исследовать влияние конструктивно-технологических параметров нового измельчителя на эффективность его работы и качество сечки:

3.1. Исследовать производительность измельчителя.

3.2. Исследовать энергетику процесса измельчения.

3.3. Исследовать качество измельчения кормов.

Изменяемые факторы, применяемые в пункте 3 программы следующие:

– частота вращения измельчающего барабана;

- подача кормов на измельчение;
- количество свободно подвешенных комбинированных ножей на барабане;
- зазор между серповидными лезвиями ножей;
- размер ячейки решета в выгрузном окне.

4. В системе многофакторных экспериментов исследовать влияние конструктивно-технологических параметров нового измельчителя на энергоёмкость его работы:

- 4.1. Исследовать производительность измельчителя.
- 4.2. Исследовать затраты энергии на измельчение.

5. Провести графоаналитическую обработку полученных результатов и сделать адекватные выводы.

Экспериментальные исследования проводились на кафедре механизации производственных процессов в животноводстве Луганского национального аграрного университета и учебного научно-производственного аграрного комплекса ЛНАУ «Колос» в 2012-2014 годах на основе существующих методик планирования экспериментов [3, 15, 16, 18, 19, 31, 32, 37, 48-50, 71, 82, 131, 132], а также методик, разработанных непосредственно автором.

3.2. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментальных исследований была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, которая состоит из подающего транспортера 1, питающего транспортера измельчителя 2, наклонного транспортера измельчителя 3, камеры измельчения 4, пульта управления 5 и общей рамы с системой привода узлов 6 (рисунок 3.1).

Рабочий орган – барабан, оснащённый свободно подвешенными комбинированными ножами, включающими вертикальные клиновидные и

поперечные серповидные лезвия (рисунок 3.2). Рабочий орган обеспечивает одновременное продольное дробление стеблей и поперечное резание слоя.

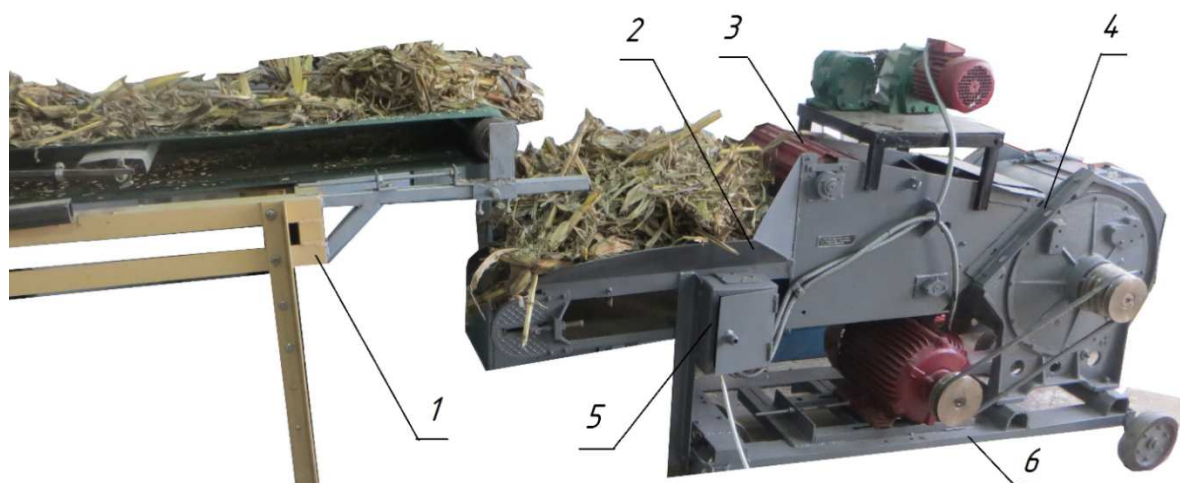
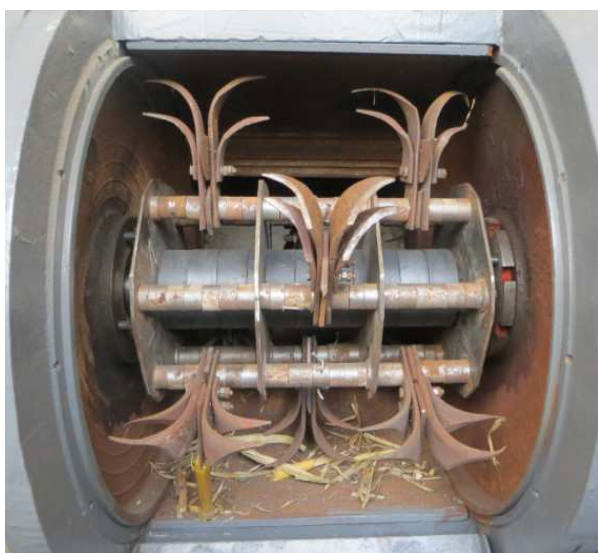
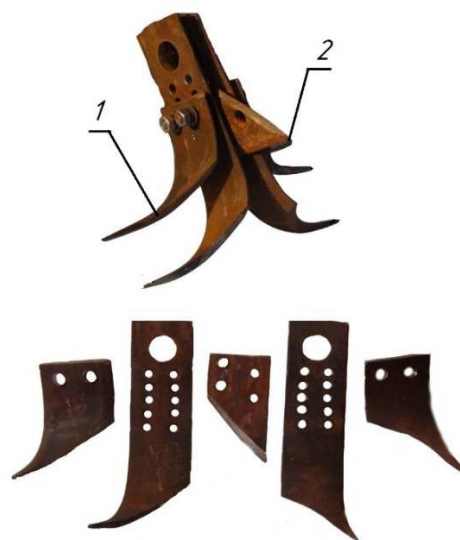


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка: 1 – подающий транспортер; 2 – питающий транспортер измельчителя; 3 – наклонный транспортер измельчителя; 4 – камера измельчения; 5 – пульт управления; 6 – общая рама с системой привода узлов



а



б

Рисунок 3.2 – Рабочий орган нового измельчителя: *а* – барабан в сборе; *б* – свободно подвешенный комбинированный нож барабана; 1 – поперечные серповидные лезвия; 2 – вертикальное клиновидное лезвие

Мощность, потребная на измельчение грубых и стебельчатых кормов в предложенной экспериментальной установке измеряется комплектом К-505 (рисунок 3.3, *а*), частота вращения барабана цифровым тахометром UT372 (рисунок 3.3, *б*), а время опыта электронным секундомером CASIO (рисунок 3.3, *в*).



Рисунок 3.3 – Контрольно-измерительное оборудование экспериментальной установки: *а* – комплект измерительной аппаратуры К-505; *б* – ручной тахометр, *в* – электронный секундомер

Частота вращения рабочего органа регулируется путем перестановки сменных шкивов привода. Привод барабана осуществляется посредством

асинхронного электродвигателя, обеспечивающего постоянную частоту вращения 1030 об/мин.

Установка укомплектована пятью шкивами с диаметром: 130; 136; 141, 147, 153 мм. Данные шкивы позволяют установить следующие частоты вращения барабана: 870, 910, 950, 990, 1030 об/мин. Шаг изменения частот вращения 40 об/мин.

Барабан измельчителя укомплектован шестью осями подвеса, на которые свободно подвешены комбинированные ножи. Количество комбинированных ножей может изменяться: 3, 6, 9 и 12 штук.

Расстояние между верхними и нижними серповидными лезвиями комбинированных ножей изменяется в пределах от 10 до 30 мм. Изменение осуществляется посредством перестановки стягивающих болтов комбинированных ножей (см. рисунок 3.2, б). Подача кормов на измельчение изменяется путем изменения скорости перемещения питающего транспортера измельчителя. Выгрузное отверстие измельчителя укомплектовано сменными решетками с квадратными отверстиями размером: 30x30; 40x40; 50x50 мм.

3.3. Методика исследования механико-технологических свойств измельчаемых кормов

Целью исследования является определение реальных показателей механико-технологических свойств измельчаемых грубых стебельчатых кормов непосредственно перед проведением экспериментальной проверки эффективности работы нового измельчителя и адекватности теоретических исследований.

Была определена влажность измельчаемых кормов, их фрикционные и прочностные свойства.

Влажность измельчаемых кормов была определена методом высушивания материала в сушильном шкафе с последующим взвешиванием на аналитических весах [17, 25, 39, 50, 55, 69, 71, 84, 102, 126, 130]

Методика основана на нагреве материала, помещенного в бюксу в сушильном шкафе (рисунок 3.4, *а*), выдержке его при температуре 105°C и остывании в эксикаторе (рисунок 3.4, *б*), с последующим взвешиванием на аналитических весах ВЛКТ-500 (рисунок 3.4, *в*).

*а**б**в*

Рисунок 3.4 – Оборудование для определения влажности измельчаемых грубых стебельчатых кормов: *а* – сушильный шкаф; *б* – эксикатор; *в* – весы

Относительная влажность определялась по формуле [3, 15, 17, 25, 28]:

$$W = \frac{G_2 - G_1}{G_1 - G_0} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

где G_0 – масса пустой бюксы, г;

G_1 – масса бюксы с навеской материала после сушки, г;

G_2 – масса бюксы с навеской материала до сушки, г.

Повторность опытов определялась величиной относительной погрешности среднего значения измеряемого показателя [16, 18, 19, 45, 48, 50, 71, 82]:

$$a = t/x, \% \quad (3.2)$$

где t – абсолютная погрешность измерений;

x – среднее арифметическое значение измеряемой величины.

Абсолютная погрешность измерений [16, 18, 19, 45, 48, 50, 71, 82]:

$$m = x_i - x, \quad (3.3)$$

где x_i – значение, полученное в результате измерения.

При определении статического и динамического коэффициентов трения использовалась наклонная доска (рисунок 3.5).

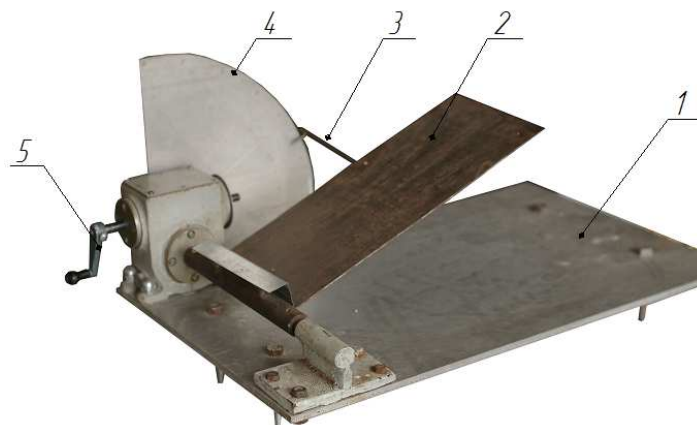


Рисунок 3.5 – Наклонная доска для определения коэффициентов трения:

1 – платформа; 2 – наклонная доска; 3 – маркер; 4 – шкала; 5 – рукоять

Если частица грубого стебельчатого корма переходит из состояния покоя в состояние движения, то движущая сила начинает превышать максимальное значение силы трения. Данная движущая сила достигается при угле установки стальной наклонной доски β .

Зная угол β , статический коэффициент трения составит [3, 28, 51, 58, 60, 100]:

$$f_c = \operatorname{tg} \beta. \quad (3.4)$$

Динамический коэффициент трения определяется из выражения [3, 28, 51, 58, 60, 100]:

$$f_d = \operatorname{tg} \beta - \frac{2 \cdot S}{g \cdot t^2 \cdot \cos \beta}, \quad (3.5)$$

где S и t – путь и время движения образца по наклонной доске.

Поскольку стебельчатые корма (например, стебли кукурузы, сорго и т.д.) достаточно толстые, в сравнении с сеном или соломой, и в своей структуре имеют армирующие прожилки, то целесообразно определить соотношение

площадей поперечного разреза армирующего и основного слоя материала отдельно.

Для этого при помощи острого лезвия проводился поперечный разрез стебля кукурузы высотой 1,5...1,8 метра в его средней части. При помощи цифрового фотооборудования с высоким разрешением производилась съемка поперечного разреза (рисунок 3.6). Далее фото выводилось на экран монитора и при помощи графической программы обводилась площадь армирующего и основного материала, затем производились вычисления, а значения заносились в таблицы.



Рисунок 3.6 – К методике определения площади поперечного разреза армирующего и основного слоя стебля

3.4. Методика исследования производительности измельчителя

Эксперимент проводился следующим образом. Посредством двигателя постоянного тока и лабораторного трансформатора устанавливалась постоянная скорость ленты подающего транспортёра 0,2 м/с. На ленту равномерным слоем укладывались следующие массы кормовых материалов: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 кг на метр погонный, что соответствует следующей подаче материала на измельчение: 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 кг/с (540; 720; 900; 1080 кг/ч).

Масса материала контролировалась при помощи электронных весов (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Весы электронные, используемые при равномерной укладке измельчаемого материала на питающий транспортер

Перед началом каждого опыта проводилась синхронизация работы подающего и питающего транспортера. Продолжительность каждого опыта – 1 минута. Продолжительность опытов контролировалась электронным секундомером (см. рисунок 3.3, в). Секундная подача материала на измельчение контролировалась системой контроля массы ADAM-4016 (рисунок 3.8).

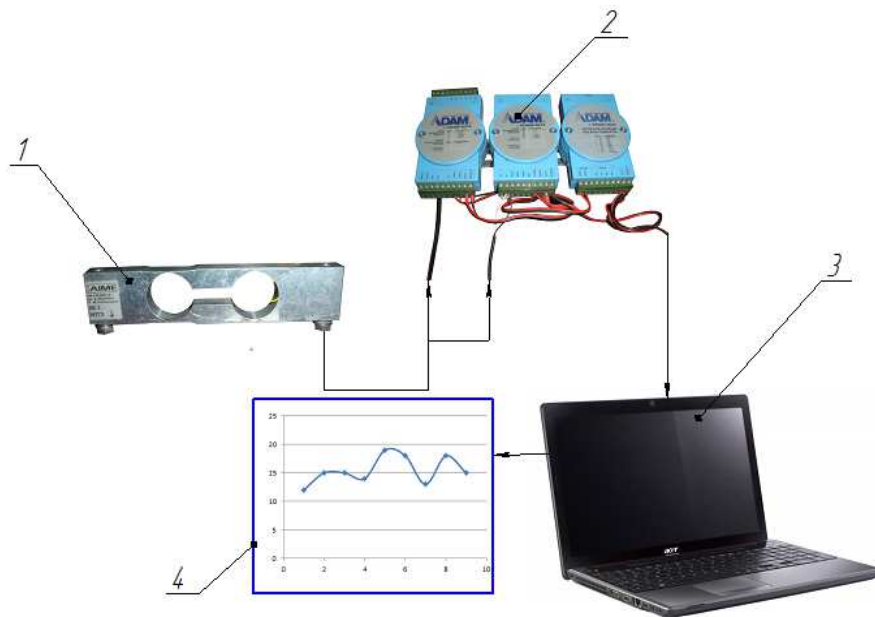


Рисунок 3.8 – Схема подключения датчика контроля массы и преобразователей сигнала: 1 – датчик контроля массы; 2 – преобразователи сигнала; 3 – ПЭВМ; 4 – графическое отображение полученного сигнала с датчика

После загрузки подающего транспортера и синхронизации его работы с продольным транспортером измельчителя проводились следующие действия:

- Устанавливалось определенное количество комбинированных ножей из ряда вариантов: 3, 6, 9 и 12 штук;
- Устанавливался определенный зазор между верхними и нижними серповидными лезвиями комбинированных ножей из ряда вариантов: 10, 15, 20, 25, 30 мм;
- Устанавливалось решето в выгрузное окно с квадратными отверстиями размером: 30x30; 40x40; 50x50 мм;
- Посредством клиноременной передачи устанавливалась одна из требуемых частот вращения рабочего органа (870, 910, 950, 990, 1030 об/мин.);
- Включался привод рабочего органа;
- Включался привод прижимного и продольного транспортёров;
- Включался привод подающего транспортера, в результате чего грубые стебельчатые корма подавались на измельчение.

В момент первого контакта ножа с измельчаемым материалом включался секундомер. По истечению заданного времени опыта общей кнопкой «STOP» выключался привод всех устройств. Масса измельченного материала взвешивалась, а полученные данные заносились в журнал наблюдений. Семикратная повторность в опыте обеспечивала погрешность не более 5%.

3.5. Методика исследования энергетики процесса измельчения и степени измельчения кормов

Эксперимент проводился следующим образом. При проведении исследований производительности измельчителя на описанных выше режимах, к приводной станции измельчителя был подключен комплект измерительный К-505, техническая характеристика которого приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1. – Техническая характеристика К-505

1. Ваттметр ГОСТ 8476-60:	
- класс точности	0,5
- напряжение	75-600 В
- класс точности	1
- напряжение	30 В
- пределы измерения	0-24 кВт
- номинальный ток параллельной цепи	3 мА
2. Амперметр ГОСТ 8711-60:	
- класс точности	0,5
- пределы измерения	0-100 А
- частота тока	40-65 Гц
3. Вольтметр ГОСТ 8711-06:	
- класс точности	0,5
- пределы измерения	75-600 В
- класс точности	1
- пределы измерения	30-75 В
- номинальный ток	7,5 мА

В процессе измельчения стрелка ваттметра в комплекте К-505 начинала отклоняться, и в установившемся режиме измельчения снимались показания, которые заносились в таблицу журнала наблюдений.

Одновременно, равномерность работы двигателя контролировалась по показаниям амперметра и вольтметра.

Следующим этапом исследований является определение средней длины резки кормов L_{cp} , для этого из десяти различных мест измельченной массы отбирают порции измельченного стебельчатого корма массой 100 г, а с каждой порции отбирают по 50 частиц наиболее характерной длины, измеряемой штангенциркулем.

Среднюю длину частиц определяют по формуле [1, 20, 48]:

$$L_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\Theta}, \text{ м}, \quad (3.7)$$

где L_i – длина исследуемой частицы измельченной массы, м;

Θ – количество частиц корма, $\Theta = 50$ штук.

В общепринятой теории измельчения степенью измельчения λ материала принято называть отношения среднего размера L_{cp1} частиц исходного материала к среднему размеру L_{cp} частиц продукта измельчения [48, 116]:

$$\lambda = \frac{L_{cp1}}{L_{cp}}, \text{ м,} \quad (3.8)$$

Однородность измельчения V определяли по формуле [48, 57, 88, 116]:

$$V = \frac{\sigma}{L_{cp}} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение длины измельченных частиц.

3.6. Результаты экспериментальных исследований

3.6.1. Результаты исследования механико-технологических свойств

Для проведения адекватных расчетов по разработанным моделям необходимо знать соответствующие механико-технологические свойства измельчаемых стеблей. Результаты исследования статического и динамического коэффициентов трения измельчаемых стеблей кукурузы приведены в таблице 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты исследования статического коэффициента трения стеблей кукурузы

Трущийся материал	Материал поверхности	Повторность опыта	Угол β , град	Относительная погрешность экспериментов, %	Значения статического коэффициента трения f_c
1	2	3	4	5	6
Внешняя оболочка стебля кукурузы	Сталь	1	28	1,41	0,541
		2	28	1,41	
		3	28	1,41	
		4	29	2,11	
		5	29	2,11	
		Среднее значение	28,4	1,69	

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6
Внутренний материал расщепленного стебля кукурузы	Сталь	1	26	1,56	0,449
		2	25	2,34	
		3	25	2,34	
		4	26	1,56	
		5	26	1,56	
		Среднее значение	25,6	1,88	
Усредненное значение статического коэффициента трения f_c для измельченной массы стеблей кукурузы					0,510

Таблица 3.3 – Результаты исследования динамического коэффициента трения стеблей кукурузы при угле установки стальной наклонной доски $\beta = 30$ град и пути, который проходил образец $S = 0,36$ м

Трущийся материал	Материал поверхности	Повторность опыта	Время движения образца t , с	Относительная погрешность экспериментов, %	Значения динамического коэффициента трения f_d
Внешняя оболочка стебля кукурузы	Сталь	1	0,67	3,08	0,38
		2	0,62	4,61	
		3	0,64	1,53	
		4	0,67	3,08	
		5	0,64	1,53	
		6	0,66	1,53	
		Среднее значение	0,65	2,56	
Внутренний материал расщепленного стебля кукурузы	Сталь	1	0,54	5,26	0,32
		2	0,59	3,51	
		3	0,54	5,26	
		4	0,56	1,75	
		5	0,60	5,26	
		6	0,58	1,75	
		Среднее значение	0,57	3,80	
Усредненное значение динамического коэффициента трения f_d для измельченной массы стеблей кукурузы					0,35

Как видно из таблиц 3.2 и 3.3, фрикционные свойства внешней оболочки стебля кукурузы и внутреннего материала расщепленного стебля существенно отличаются. В процессе измельчения происходит трение стеблей по рабочему органу частиц как внешней оболочкой, так и внутренним материалом, поэтому в теоретических расчетах целесообразно применять усредненное значение коэффициентов трения. В авторитетных источниках информации (например, [85, с. 30]) указаны значения статического (0,52-0,54) и динамического (0,41-0,47) коэффициентов трения для стеблей кукурузы. Однако данные значения получены только для внешней оболочки стебля. Пренебречь влиянием на процесс трения различных материалов, из которых состоит стебель кукурузы нельзя, это приведет к существенному расхождению результатов теоретических и экспериментальных данных.

Уборка кукурузы на зерно предполагает измельчение незерновой части урожая. Данную незерновую часть урожая (стебли и обмолоченные стержни початков) измельчают и оставляют на поле как удобрение, однако в условиях ресурсосберегающих технологий данную измельченную массу целесообразно использовать в качестве корма для крупного рогатого скота. В Российской Федерации влажность стеблей кукурузы в момент ее уборки на зерно находится в интервале 18-30%. Следовательно, экспериментальные исследования целесообразно проводить на стеблях кукурузы с влажностью из приведённого выше интервала.

Полученные выше значения статического и динамического коэффициентов трения определялись при фиксированной влажности стеблей кукурузы. Результаты экспериментального исследования влажности измельчаемых стеблей кукурузы приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты экспериментального исследования влажности измельчаемых стеблей кукурузы

№ опыта	Влажность стеблей, %	Относительная погрешность экспериментов, %
1	24,2	1,10
2	23,5	1,84
3	23,5	1,84
4	23,5	1,84
5	25,0	4,43
Среднее значение	23,94 ≈ 24	2,21

Методика определения соотношения площадей армирующего и основного слоя материала в поперечном разрезе стебля кукурузы приведена в разделе 3.

Результаты исследований представлены в таблице 3.5.

Измерение площадей армирующего и основного слоя производилось при помощи программы Компас-3D (рисунок 3.9). Измерения проводились по среднему диаметру стебля.

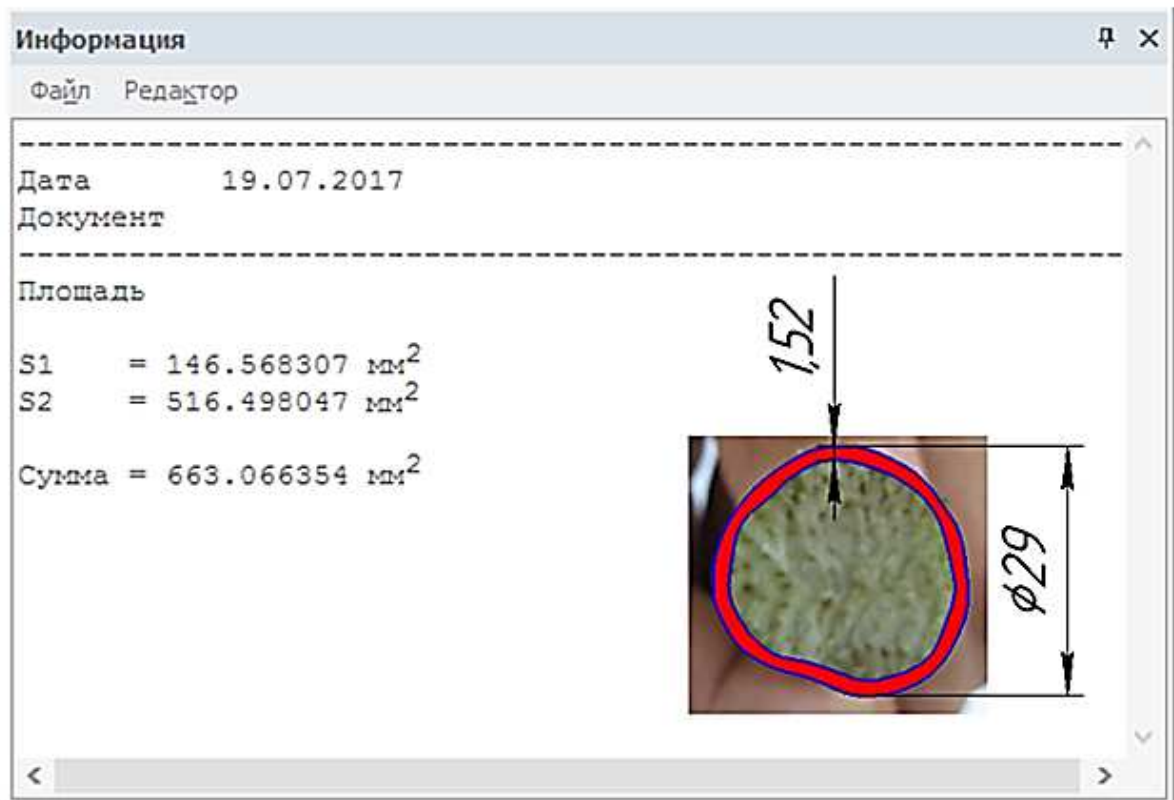


Рисунок 3.9 – Измерение площадей армирующего и основного слоя материала в поперечном разрезе стебля кукурузы при помощи программы Компас-3D

Поскольку армирующие прожилки расположены по периферии поперечного разреза стебля, то в теоретических расчётах целесообразно использовать эквивалентную толщину слоя прожилок, равную удвоенному значению толщины приповерхностного премированного слоя в сумме с тонкой внешней оболочкой (см. рисунок 3.9).

Таблица 3.5 – Результаты исследования поперечного разреза стебля кукурузы

Номер опыта	Общая площадь поперечного сечения армирующих прожилок стебля ΣS_{II} , мм ²	Общая площадь поперечного сечения основного материала стебля ΣS_o , мм ²	Эквивалентная толщина слоя прожилок h_i' , мм	Толщина слоя основного материала h_i'' , мм
1	150,3	512,7	3,8	26,2
2	138,6	498,5	2,7	25,8
3	146,2	542,8	3,2	25,3
4	151,7	478,9	2,9	24,5
5	135,6	420,8	2,9	27,1
6	123,9	410,3	2,7	23,5
7	128,7	421,1	2,5	26,1
8	164,8	505,2	3,1	26,8
9	144,3	475,9	2,9	24,5
10	136,8	498,3	2,9	24,6
11	138,8	430,7	2,8	23,8
12	154,2	551,8	3,4	23,7
13	149,2	505,8	3,2	25,4
14	147,8	516,3	3,2	24,7
15	145,3	507,5	3,2	22,8
16	144,8	497,8	2,9	26,1
17	116,5	420,1	2,7	22,4
18	138,7	475,3	2,8	23,7
19	119,8	415,7	2,5	23,9
20	143,2	526,3	3,2	25,3
Ср.	140,96	480,59	2,98	24,81

Соотношения площадей армирующего и основного слоя материала в поперечном разрезе стебля кукурузы целесообразно определить по средним значениям измеряемых величин. Следовательно, соотношения площадей составит 1:3,4. Поскольку строение стебля кукурузы одинаково по всей его

длине, а отличается лишь диаметром, то можно предположить, что полученное соотношение справедливо для поперечного среза на любой высоте стебля. Полученные значения использовались в теоретических расчетах.

3.6.2. Результаты проведения однофакторных экспериментальных исследований производительности измельчителя

Целью данных исследований было установление влияния частоты вращения рабочего органа, количества комбинированных ножей рабочего органа и подачи материала в измельчитель на его производительность.

При проведении исследований обеспечивалась подача 0,15; 0,20; 0,25 и 0,30 кг/с (540; 720; 900; 1080 кг/ч). Устанавливалась частота вращения рабочего органа 870, 910, 950, 990 и 1030 об/мин. Результаты проведенных экспериментальных исследований зависимости производительности измельчителя от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при различной подаче материала на измельчение приведены на рисунках 3.10-3.12.

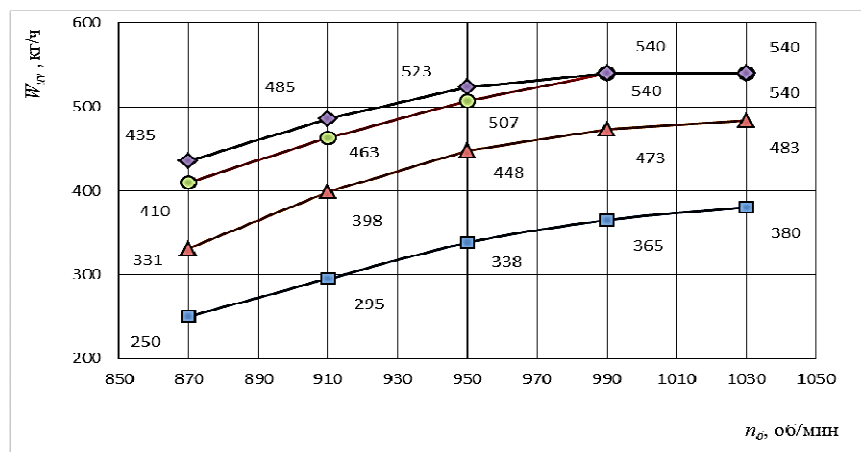


Рисунок 3.10 – Экспериментальная зависимость производительности измельчителя от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при подаче стеблей на измельчение 0,15 кг/с (540 кг/ч):

- — 3 ножа на рабочем органе
- ▲ — 6 ножей на рабочем органе
- — 9 ножей на рабочем органе
- ◆ — 12 ножей на рабочем органе

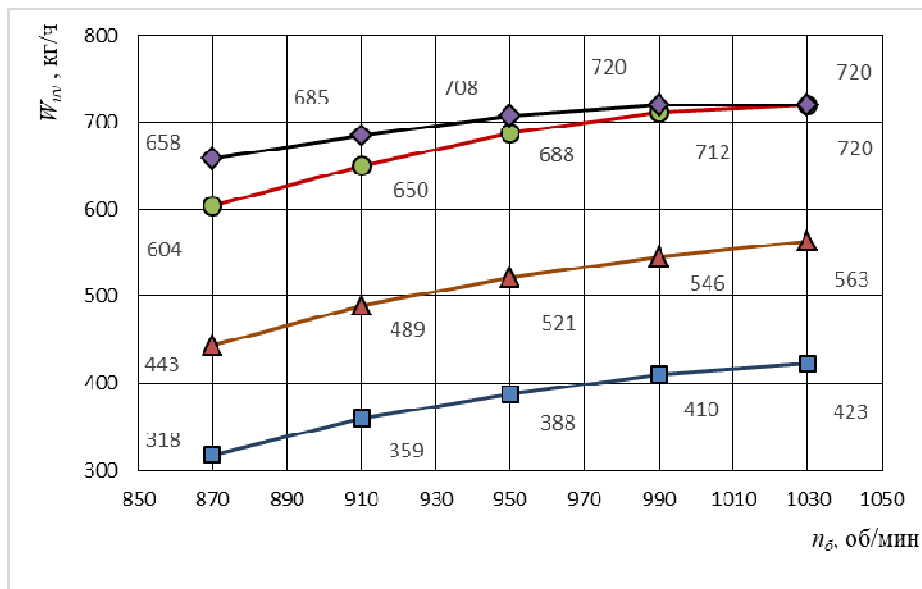


Рисунок 3.11 – Экспериментальная зависимость производительности измельчителя от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при подаче стеблей на измельчение 0,20 кг/с (720 кг/ч):

■ — 3 ножа на рабочем органе ▲ — 6 ножей на рабочем органе
● — 9 ножей на рабочем органе ◆ — 12 ножей на рабочем органе

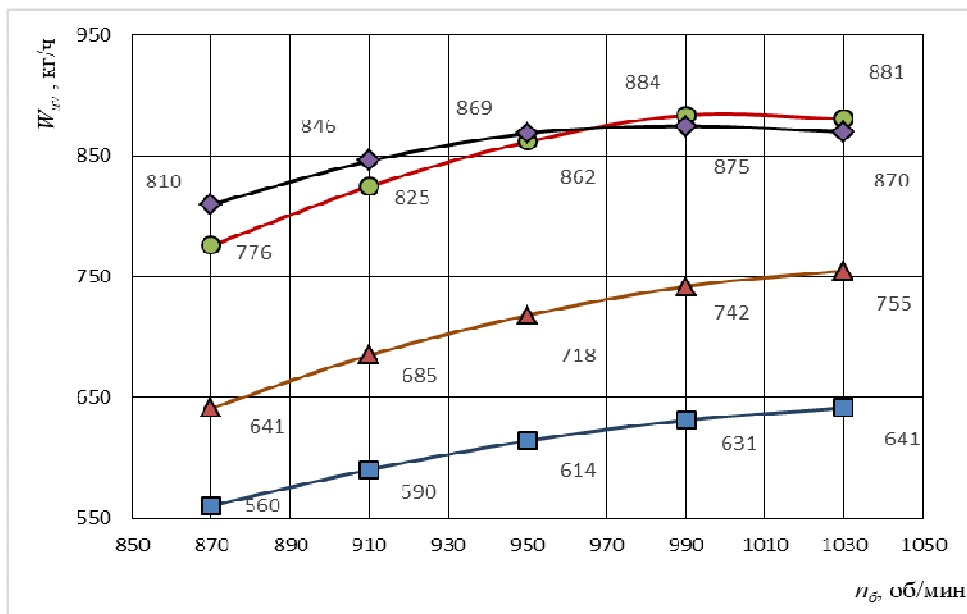


Рисунок 3.12 – Экспериментальная зависимость производительности измельчителя от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при подаче стеблей на измельчение 0,25 кг/с (900 кг/ч):

■ — 3 ножа на рабочем органе ▲ — 6 ножей на рабочем органе
● — 9 ножей на рабочем органе ◆ — 12 ножей на рабочем органе

Как видно из приведенных выше экспериментальных зависимостей, увеличивать подачу более 0,25 кг/с (900 кг/ч) нецелесообразно, поскольку даже при такой подаче измельчитель достигает своей максимально возможной производительности 0,246 кг/с (884 кг/ч). Исходя из этого, экспериментальные исследования на подаче 0,30 кг/с (1080 кг/ч) не проводились.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что рациональная частота вращения рабочего органа находится в интервале 910-1030 об/мин. При данной частоте вращения рабочего органа достигается максимальная производительность измельчителя 825-884 кг/ч, причем измельченная масса полностью выводится воздушным потоком в выгрузное отверстие через специальное решето.

Увеличивать частоту вращения рабочего органа выше 1030 об/мин нецелесообразно, поскольку уже при данной частоте и подаче 0,25 кг/с наступает диссонанс производительности рабочего органа и пропускной способности решета. В результате чего решето не может пропустить то количество измельченной массы, которое производит рабочий орган. Возникает необходимость в увеличении размера ячейки решета, а это приводит к недопустимому увеличению длины сечки, в результате чего полученная измельченная масса не соответствует зоотехническим требованиям по длине.

Также, из графических зависимостей видно, что в рациональный интервал частот (950-1030 об/мин) попадает режим работы измельчителя с девятью и двенадцатью шарнирно подвешенными ножами. Определить рациональное количество ножей можно по показателю затрат энергии на измельчение.

Кроме того, при частоте вращения рабочего органа 1030 об/мин сила удара шарнирных ножей по измельчаемым стеблям приводит к их значительному отклонению в радиальном направлении, и второй ярус лезвий начинает работать неэффективно; как следствие, образуется сечка, длина которой более 50 мм. Сечка такого размера не может пройти ячейки решета и попадает на

доизмельчение, а это, в свою очередь, приводит к тому, что измельчающий аппарат не справляется с подачей и производительность падает.

На длину сечки, получаемой при измельчении стеблей, оказывает влияние зазор между поперечными серповидными лезвиями комбинированных ножей. Однако данный параметр неразрывно связан с подачей и частотой вращения рабочего органа. Адекватно оценить его влияние можно только при проведении трехфакторного эксперимента. Для упрощения поисковых однофакторных экспериментов при оценке производительности измельчителя было установлено среднее значение зазора, которое составило 20 мм. Сделано допущение, что рациональное значение зазора можно получить в результате оптимизации методом планирования и проведения многофакторного эксперимента. Кроме того, в выгрузное окно было установлено решето со средним размером ячейки 40x40 мм.

3.6.3. Результаты проведения однофакторных экспериментальных исследований энергетики процесса измельчения

Целью данных исследований было установление влияния частоты вращения рабочего органа, количества комбинированных ножей рабочего органа и подачи материала в измельчитель на затраты мощности при измельчении.

При проведении исследований обеспечивалась подача 0,25 кг/с (900 кг/ч). На рабочем органе устанавливались 9 и 12 комбинированных ножей соответственно. Зазор между поперечными лезвиями составлял 25 мм. Устанавливалась частота вращения рабочего органа 870, 910, 950, 990 и 1030 об/мин.

Результаты проведенных экспериментальных исследований зависимости затрат мощности на измельчение от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при рациональной подаче материала на измельчение приведены на рисунке 3.13.

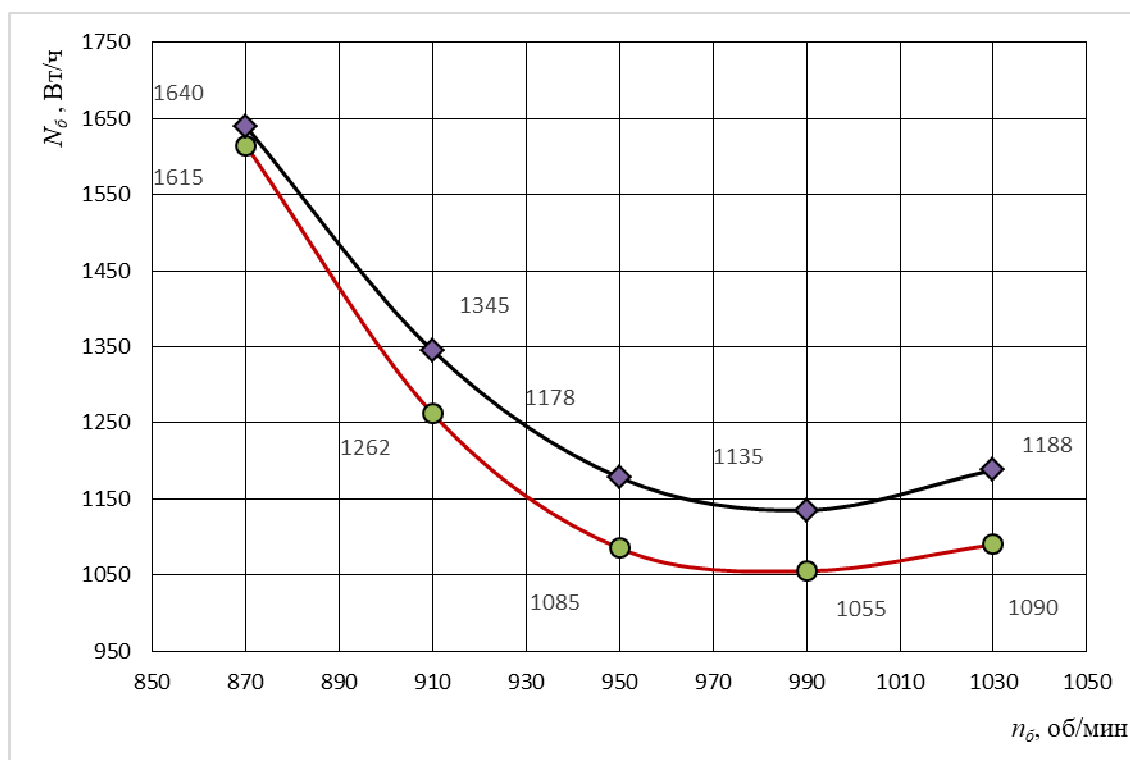


Рисунок 3.13 – Экспериментальная зависимость затрат мощности на измельчение от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при подаче стеблей на измельчение 0,25 кг/с (900 кг/ч):

● — 9 ножей на рабочем органе ◆ — 12 ножей на рабочем органе

Анализ зависимости, приведённой на рисунке 3.13 показал, что рациональное количество комбинированных ножей на рабочем органе составляет 9 штук. Увеличение количества ножей приводит к росту затрат мощности, при этом затраты мощности на измельчение возрастают по следующим причинам:

- возрастает масса барабана;
- возрастает вентиляционный эффект, создаваемый ножами;
- при работе на девяти комбинированных ножах сквозь слой подаваемого материала проходит сначала 8 серповидных лезвий, а затем 4 серповидных лезвия. Это обеспечивает пульсирующее силовое воздействие на слой, способствующее расщеплению стеблей. При работе на двенадцати комбинированных ножах сквозь слой проходит постоянно 8 серповидных

лезвий и пульсирующее воздействие на измельчаемый слой отсутствует, а удельное сопротивление возрастает.

При использовании 9 комбинированных ножей наименьшие затраты мощности на измельчение находятся в интервале частот вращения рабочего органа 950-1030 об/мин. Полученный интервал исключает рациональную точку 910 об/мин из интервала частот, определенного при исследовании производительности измельчителя. Следовательно, интервал поиска сужается. Данный интервал частот (950-1030 об/мин) целесообразно использовать при оптимизации процесса измельчения.

Затраты мощности на измельчение в полученном рациональном интервале частот наименьшие, потому что достигается требуемая сила удара комбинированным ножом по слою стеблей, причем скоростной режим измельчения позволяет осуществлять не только рубку, но и скользящее резание поперечными серповидными ножами. В результате создаются такие условия, при которых происходит одновременное перерезание стеблей в поперечной плоскости и ударное расщепление частиц по их длине.

3.6.4. Результаты исследования качества измельчения стебельчатых кормов

Целью исследования является определение соответствия полученной длины сечки зоотехническим требованиям, при условии работы измельчителя в рациональном интервале частот вращения рабочего органа и применении 9 шарнирно-подвешенных комбинированных ножей.

Кроме того, проводилось исследование фракционного состава сечки, полученной на рациональных режимах работы нового измельчителя.

На фракции разбирались все отобранные для измерения порции измельченного стебельчатого корма массой 100 г.

Результаты исследования средней длины измельченных частиц приведены в таблице 3.6-3.8. Результаты в каждой ячейке таблицы являются средним арифметическим значением длины сечки в пробе.

Таблица 3.6 – Результаты исследования средней длины измельченных частиц при использовании 9 шарнирно-подвешенных комбинированных ножей и решета с размером ячейки 30x30 мм.

№ опыта	Средняя длина измельчённых частиц, L_{cp} , мм		
	950 об/мин	990 об/мин	1030 об/мин
1	46	36	23
2	32	25	29
3	31	42	37
4	44	28	32
5	48	31	44
6	30	46	25
7	28	29	47
Ср.	36,2	33,9	33,9
Среднеквадратичное отклонение длины измельченных частиц σ	9,3	7,8	9,2
Отклонение длины полученных частиц от среднего значения V , %	25,5	23,0	27,2

При установке решета с ячейкой 30x30 мм и работе на рациональной частоте вращения рабочего органа среднее значение длины частиц измельченных стеблей составляет 33,9 мм. Данное значение существенно ниже максимально допустимого для КРС (50 мм). Это нецелесообразно, поскольку сопряжено с дополнительными затратами энергии. В результате установки данного решета часть кормов потоком воздуха возвращается на повторное доизмельчение. В итоге образуется переизмельченная сечка, а выходящий из выгрузного окна воздушный поток перенасыщен сложноулавливаемыми пылевидными частицами.

Таблица 3.7 – Результаты исследования средней длины измельченных частиц при использовании 9 шарнирно-подвешенных комбинированных ножей и решета с размером ячейки 40x40 мм

№ опыта	Средняя длина измельчённых частиц, L_{cp} , мм		
	950 об/мин	990 об/мин	1030 об/мин
1	52	42	34
2	47	49	38
3	42	48	42
4	53	43	49
5	55	50	37
6	39	49	41
7	44	50	38
Ср.	47,4	47,2	39,9
Среднеквадратичное отклонение длины измельченных частиц σ	6,07	3,35	4,81
Отклонение длины полученных частиц от среднего значения V , %	12,8	7,0	12,1

При установке решета с ячейкой 40x40 мм и работе на рациональной частоте вращения рабочего органа среднее значение длины частиц измельченных стеблей составляет 47,2 мм. Такая длина сечки рациональна и исключает дополнительные энергозатраты на переизмельчение стеблей. Результат достигается за счет согласования производительности измельчителя и пропускной способности решета вследствие минимального количества отсеченных от стебля частиц, возвращаемых воздушным потоком на доизмельчение.

Таблица 3.8 – Результаты исследования средней длины измельченных частиц при использовании 9 шарнирно-подвешенных комбинированных ножей и решета с размером ячейки 50x50 мм

№ опыта	Средняя длина измельчённых частиц, L_{cp} , мм		
	950 об/мин	990 об/мин	1030 об/мин
1	70	67	61
2	69	58	65
3	81	63	61
4	67	64	58
5	52	52	60
6	58	66	50
7	65	57	55
Ср.	66,0	61,0	58,6
Среднеквадратичное отклонение длины измельченных частиц σ	9,2	5,5	4,9
Отклонение длины полученных частиц от среднего значения V , %	14,0	8,9	8,3

При установке решета с ячейкой 50x50 мм и работе на рациональной частоте вращения рабочего органа среднее значение длины частиц измельченных стеблей составляет 61 мм. Такая длина сечки недопустима. Решето с ячейкой 50x50 мм применять нецелесообразно, поскольку оно пропускает частицы, длина которых значительно превышает допустимые значения.

Из вышеизложенного следует, что в интервале рациональных частот вращения рабочего органа 950-1030 об/мин, при подаче стеблей на измельчение 0,25 кг/с (900 кг/ч), в условиях применения 9 комбинированных ножей целесообразно применять решето выгрузного окна с размером ячейки 40x40 мм.

При этом длина сечки будет находиться в рациональном интервале 39,9 – 47,4 мм.

Следующим этапом исследований являлось изучение фракционного состава сечки, полученной в наилучших рациональных условиях работы измельчителя, результаты исследований приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Фракционный состав измельченных стеблей

Измельчаемый материал (влажность, %)	Частота вращения рабочего органа, об/мин	Количество частиц, %, размеров					Продольное дробление стеблей, %
		до 10 мм	до 30 мм	до 50 мм	до 100 мм	100 и более мм	
Стебли кукурузы (влажность 24 %)	950	14,4	28,5	56,8	0,3	-	91
	990	17,5	32,7	49,8	-	-	95
	1030	20,1	35,2	44,7	-	-	97

Как видно из таблицы 3.9, при работе на рациональных режимах измельчитель обеспечивает такой фракционный состав сечки, при котором отсутствуют частицы, длина которых превышает максимально допустимое значение (50 мм). Кроме того, практически половина частиц имеет длину от 30 до 50 мм. Количество переизмельченных частиц (длина которых менее 10 мм) не превышает 20%. Сечка с таким фракционным составом качественно смешивается с другими кормами при производстве многокомпонентных кормовых смесей как в стационарных смесителях, так и в мобильных раздатчиках-смесителях кормов.

Следовательно, рациональный интервал частот вращения рабочего органа составляет 950-1030 об/мин. Рациональная подача стеблей на измельчение составляет 0,25 кг/с (900 кг/ч). Необходимое количество комбинированных ножей на рабочем органе 9 штук. При этом зазор между поперечными серповидными лезвиями составляет 20 мм. Рациональный размер ячейки решета выгрузного окна – 40х40 мм. Это обеспечивает достижение производительности измельчителя 825-884 кг/ч, при затратах мощности на измельчение 1055-1090 Вт/ч.

Полученные значения необходимо использовать при оптимизации процесса измельчения методом планирования и реализации многофакторного эксперимента.

Выводы

1. Экспериментальным путем установлены следующие механико-технологические характеристики измельчаемых стеблей кукурузы:

– статический коэффициент трения внешней оболочки исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,541;

– статический коэффициент трения внутреннего материала исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,449;

– усредненное значение статического коэффициента трения составляет 0,510;

– динамический коэффициент трения внешней оболочки исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,38;

– динамический коэффициент трения внутреннего материала исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,32;

– усредненное значение динамического коэффициента трения составляет 0,35;

– соотношения площадей армирующего и основного слоя материала в поперечном разрезе стебля кукурузы составляет 1:3,4.

2. В результате однофакторных экспериментальных исследований определены следующие рациональные параметры нового измельчителя грубых стебельчатых кормов:

– рациональная подача стеблей кукурузы на измельчение 0,25 кг/с;

– рациональная частота вращения рабочего органа 950-1030 об/мин;

– рациональное количество комбинированных ножей на рабочем органе 9 штук;

– рациональная производительность изучаемого измельчителя находится в пределах 825-884 кг/ч;

– затраты мощности на измельчение составляют 1055-1090 Вт/ч;

– в рациональных условиях энергоёмкость процесса измельчения составит 1,193-1,31 кВтч/т.

Вышеприведенные данные получены в результате проведения экспериментов со стеблями кукурузы, среднее значение влажности которых составляло 24%.

3. Расхождение результатов, полученных теоретически и экспериментально в середине рационального интервала частот вращения рабочего органа 990 об/мин составляет:

- по производительности 3,91%;
- по затратам мощности на измельчение 4,46%.

4. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что предложенные математические модели, позволяющие определять производительность нового измельчителя грубых стебельчатых кормов и затраты мощности на измельчение адекватно описывают реальные процессы и могут использоваться при теоретических исследованиях и опытно-конструкторских разработках.

5. Сужение рациональных интервалов значений, полученных экспериментальным путем, с целью определения оптимальных значений действующих факторов целесообразно провести методами планирования и проведения многофакторного эксперимента.

4 ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Методика проведения и обработки результатов многофакторного эксперимента

Оптимизация технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов проводилась методом реализации полного факторного эксперимента (ПФЭ) со следующим планом действий.

1. Выбор параметра оптимизации.
2. Выбор факторов, воздействующих на объект исследования.
3. Кодирование факторов и выбор интервалов их варьирования.
4. Определение числа повторности опытов.
5. Рандомизация опытов.
6. Составление матрицы планирования.
7. Проведение эксперимента.
8. Расчет коэффициентов регрессии математической модели.
9. Оценка рассеивания результатов.
10. Проверка однородности дисперсии (критерий Кохрена).
11. Проверка адекватности модели (критерий Фишера).
12. Проверка значимости коэффициентов регрессии (критерий Стьюдента).
13. Построение поверхностей отклика и их анализ.
14. Графоаналитический анализ результатов исследования.

Кодирование факторов [3, 15, 28, 41, 50, 82, 100, 111, 113]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon}, \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{X_i^B - X_i^H}{2}, \quad (4.2)$$

где X_i – кодированное значение фактора (безразмерная величина), верхний уровень обозначается +1, а нижний - 1 (в центре нулевой уровень);

X_i – натуральное значение фактора (именованная величина в размерности фактора);

X_{oi} – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

ε – натуральное значение интервала варьирования фактора;

X_i^B – значение фактора на верхнем уровне;

X_i^H – значение фактора на нижнем уровне.

Для получения математической модели эксперимента был реализован трехуровневый план Бокса-Бенкина второго порядка. Для данного плана уравнение регрессии имеет вид [3, 15, 28, 41, 45, 50, 82, 100, 111, 113]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (4.3)$$

где y – расчетное значение критерия оптимизации;

x_i, x_j – кодовое обозначение факторов;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии.

Коэффициент b_0 , коэффициенты при линейных членах уравнения регрессии b_i и коэффициенты регрессии при взаимодействии факторов b_{ij} определялись по формулам [107, 108, 111, 113, 125, 127, 128]:

$$b_0 = \frac{\sum_{II=1}^N \bar{y}_{II}}{N}, \quad b_i = \frac{\sum_{II=1}^N x_{iII} \cdot \bar{y}_{II}}{N}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{II=1}^N x_{iII} \cdot x_{jII} \cdot \bar{y}_{II}}{N}, \quad (4.4)$$

где \bar{y}_{II} – среднее арифметическое значение критерия оптимизации в строке;

N – количество опытов (число строк в матрице эксперимента);

x_{iII}, x_{jII} – нормированные значения факторов в II -м опыте.

Оценка рассеивания результатов опытов и определение дисперсии критерия оптимизации производились по формуле [16, 18, 19, 48, 50, 71, 82]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{II=1}^N \sum_{i=1}^m (y_{iII} - \bar{y}_{II})^2}{N \cdot (m-1)}, \quad (4.5)$$

где y_{iII} – значение критерия оптимизации в каждом из параллельных опытов;
 m – число повторностей одного опыта.

Проверка однородности дисперсии осуществлялась по критерию Кохрена [16, 18, 19, 48, 50, 71, 82]:

$$G = \frac{\max \left[\sum_{i=1}^m (y_{iII} - \bar{y}_{II})^2 \right]}{\sum_{II=1}^N \sum_{i=1}^m (y_{iII} - \bar{y})^2}. \quad (4.6)$$

Однородность дисперсии показывает, что рассеивание результатов одного порядка. Проверка адекватности модели (проверка пригодности уравнения регрессии для описания исследуемого процесса) проводилась с помощью оценки дисперсии адекватности по F -критерию Фишера [16, 18, 19, 48, 50, 71, 82]:

$$F = \frac{\sum_{II=1}^N (\hat{y} - y_{II})^2}{N - d} : \frac{\sum_{II=1}^N \sum_{i=1}^m (y_{iII} - \bar{y}_{II})^2}{N \cdot (m-1)}, \quad (4.7)$$

где \hat{y} – вычисленное по уравнению регрессии значение критерия оптимизации;

d – число членов уравнения регрессии.

Проверка значимости коэффициентов регрессии осуществляется с помощью t_i – критерия Стьюдента [16, 18, 19, 48, 50, 71, 82]:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{bi}}, \quad (4.8)$$

где S_{bi} – квадратичная ошибка коэффициента регрессии [16, 18, 19, 48, 50, 71, 82].

В процессе измельчения можно выделить действующие параметры (факторы) и реакции на воздействия (отклики или критерии оптимизации) [71, 82, 100, 126, 130-132].

Критерием оптимизации процесса измельчения грубых стебельчатых кормов является удельная энергоёмкость \mathcal{E}_y :

$$\mathcal{E}_y = \frac{N_c}{W\lambda}, \text{ кВтч/т}, \quad (4.9)$$

где N_c – суммарная мощность процесса измельчения, кВт;

W – производительность измельчителя кормов, т/ч;

λ – степень измельчения кормов.

На основании проведенных теоретических исследований в качестве факторов выбраны: частота вращения барабана – n_6 , об/мин; подача кормов в камеру измельчения – q_c , кг/с; зазор между серповидными лезвиями комбинированного ножа – h_4 , мм.

4.2. Результаты исследования технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов методом планирования многофакторного эксперимента

Для анализа результатов экспериментальных исследований использовалась программа STATUP «Регрессионный многофакторный анализ». Для обработки опытных данных использовались программы: Statistica 8 for Windows и Mathcad 15, при помощи которых были рассчитаны коэффициенты регрессии, по которым составлены математические модели по каждому критерию оптимизации как функций откликов от n_6 , q_c , и h_4 . При оптимизации технологических процессов измельчения грубых стебельчатых кормов был реализован трехуровневый план Бокса-Бенкина для трех факторов. В большинстве исследованных литературных источниках по данной тематике ученые и исследователи применяли план второго порядка, поскольку процесс сложный, и при расчете значимыми оказываются коэффициенты регрессии при факторах в модели, возведенные во вторую степень. Кодировка факторов проводилась по выражениям (3.10) и (3.11) и представлена в таблице 4.1.

Согласно общепринятой методике исследования, доверительная вероятность $p=0,95$, а повторность опыта трёхкратная. Опыты проводились в последовательности возрастания случайных чисел (рандомизация опыта). Результаты многофакторного эксперимента обработаны в программной среде Statistica 8.0 for Windows [15]. Были проверены однородности дисперсий, статистическая значимость коэффициентов регрессии и адекватности моделей (Приложение В). В результате статистической обработки результатов многофакторного эксперимента было получено уравнение регрессии в раскодированном виде. Матрица планирования многофакторного эксперимента, направленного на исследование процесса измельчения стебельчатых кормов, представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Кодирование факторов и выбор интервалов их варьирования

Наименование	Значения		
Обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Наименование фактора	Частота вращения барабана, n_b , об/мин.	Подача кормов в камеру измельчения, q_c , кг/с.	Зазор между серповидными лезвиями ножа, h_4 , мм.
Базовый уровень	990	0,25	25
Интервал варьирования	40	0,03	5
Верхний уровень фактора	1030	0,28	30
Нижний уровень фактора	950	0,22	20
Функция отклика	U – энергоёмкость процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов, \mathcal{E}_y , кВт·ч/т		

На основании значений рассчитанных коэффициентов (см. таблицу 4.2), уравнение регрессии примет вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_y = & 147,799219 - 0,264146 \cdot n_{\bar{o}} + 0,000127 \cdot n_{\bar{o}}^2 - 109,750000 \cdot q_c + \\ & + 125,000000 \cdot q_c^2 - 0,213042 \cdot h_4 - 0,001400 \cdot h_4^2 + 0,045833 \cdot n_{\bar{o}} \cdot q_c + \\ & + 0,000112 \cdot n_{\bar{o}} \cdot h_4 + 0,116667 \cdot q_c \cdot h_4, \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Данное уравнение регрессии позволяет оценить влияние факторов на технологический процесс измельчения грубых стебельчатых кормов и оптимизировать параметры измельчителя. Для нахождения оптимальных значений действующих факторов необходимо решить уравнение (4.10).

Таблица 4.2 – Матрица планирования многофакторного эксперимента

№ точки плана	Рандомизация		X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1 ²	X2 ²	X3 ²	Факторы в опыте			Функция отклика Y					
												X1 об/мин	X2 кг/с	X3 мм						
1	64	14	+	+	0	+	0	0	+	+	0	1030	0,28	25	1,53					
2	40	9	-	-	0	+	0	0	+	+	0	950	0,22	25	1,45					
3	90	15	+	-	0	-	0	0	+	+	0	1030	0,22	25	1,39					
4	40	10	-	+	0	-	0	0	+	+	0	950	0,28	25	1,37					
5	20	3	+	0	+	0	+	0	+	0	+	1030	0,25	30	1,37					
6	26	5	-	0	-	0	+	0	+	0	+	950	0,25	20	1,39					
7	18	2	+	0	-	0	-	0	+	0	+	1030	0,25	20	1,41					
8	31	6	-	0	+	0	-	0	+	0	+	950	0,25	30	1,26					
9	36	7	0	+	+	0	0	+	0	+	+	990	0,28	30	1,35					
10	44	11	0	-	-	0	0	+	0	+	+	990	0,22	20	1,22					
11	21	4	0	+	-	0	0	-	0	+	+	990	0,28	20	1,28					
12	46	12	0	-	+	0	0	-	0	+	+	990	0,22	30	1,22					
13	03	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	990	0,25	25	1,12					
14	60	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	990	0,25	25	1,10					
15	39	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	990	0,25	25	1,14					
Коэффициенты регрессии																				
Y	b0 = 147,799219		b1 = -0,264146		b2 = 0,000127		b3 = -109,750000		b4 = 125,000000		b5 = -0,213042		b6 = 0,001400		b7 = 0,045833		b8 = 0,000112		b9 = 0,116667	

$$\begin{cases} \frac{d\mathcal{E}_y}{dn_{\delta}} = -0,264146 + 0,000254 \cdot n_{\delta} + 0,045833 \cdot q_c + 0,000112 \cdot h_4; \\ \frac{d\mathcal{E}_y}{dq_c} = -109,750000 + 0,045833 \cdot n_{\delta} + 250,000000 \cdot q_c + 0,116667 \cdot h_4; \\ \frac{d\mathcal{E}_y}{dh_4} = -0,213042 + 0,000112 \cdot n_{\delta} + 0,116667 \cdot q_c - 0,002800 \cdot h_4. \end{cases} \quad (4.11)$$

Решив систему уравнений (4.2) методом Крамера с помощью компьютерной программы «Mathcad 15» [15], получим оптимальные значения факторов.

$$\Delta = \begin{cases} 0,000254 + 0,045833 + 0,000112; \\ 0,045833 + 250,0000 + 0,116667; = 1,8 \cdot 10^{-4} \\ 0,000112 + 0,116667 - 0,002800. \end{cases}$$

$$\Delta x_1 = \begin{cases} -0,264146 + 0,045833 + 0,000112; \\ -109,7500 + 250,0000 + 0,116667; = 0,178 \\ -0,213042 + 0,116667 - 0,002800. \end{cases}$$

$$\Delta x_2 = \begin{cases} -0,264146 + 0,000254 + 0,000112; \\ -109,7500 + 0,045833 + 0,116667; = 4,73 \cdot 10^{-5} \\ -0,213042 + 0,000112 - 0,002800. \end{cases}$$

$$\Delta x_3 = \begin{cases} -0,264146 + 0,000254 + 0,045833; \\ -109,7500 + 0,045833 + 250,0000; = 4,4 \cdot 10^{-3} \\ -0,213042 + 0,000112 + 0,116667. \end{cases}$$

$$X_1 = \Delta x_1 / \Delta = 0,178 / 1,8 \cdot 10^{-4} = 988 \text{ об/мин};$$

$$X_2 = \Delta x_2 / \Delta = 4,73 \cdot 10^{-5} / 1,8 \cdot 10^{-4} = 0,263 \text{ кг/с};$$

$$X_3 = \Delta x_3 / \Delta = 4,4 \cdot 10^{-3} / 1,8 \cdot 10^{-4} = 24 \text{ мм}.$$

Таблица 4.3 – Результаты расчета оптимальных значений факторов

Наименование фактора	n_{δ} , об/мин	q_c , кг/с	h_4 , мм.
Значение фактора	988	0,263	24
Энергоемкость процесса измельчения $\mathcal{E}_y = 1,08$, кВт·ч/т			

На основании полученных данных при помощи программы Statistica 8.0 [15] были построены двумерные сечения (рисунок 4.1).

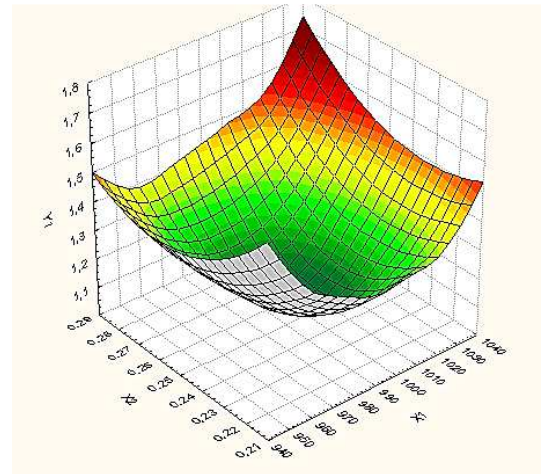
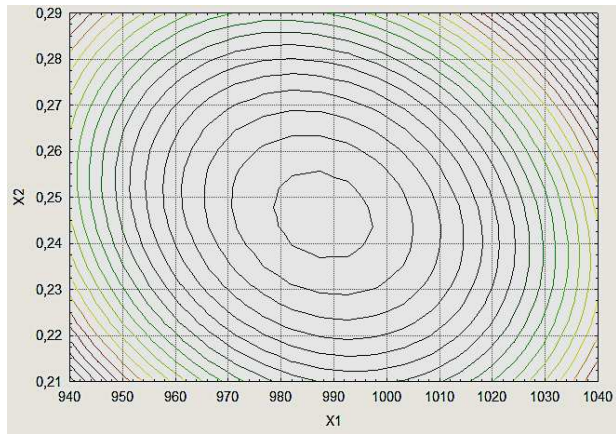
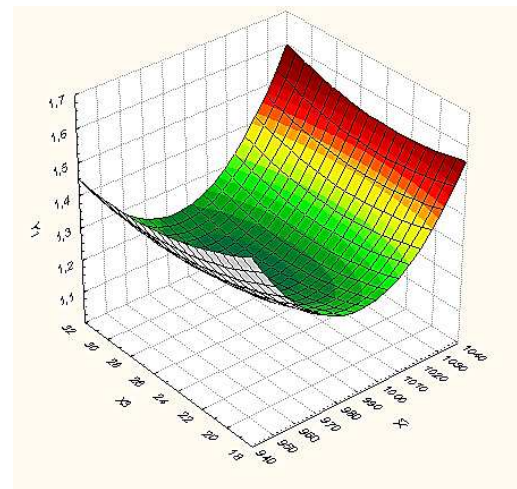
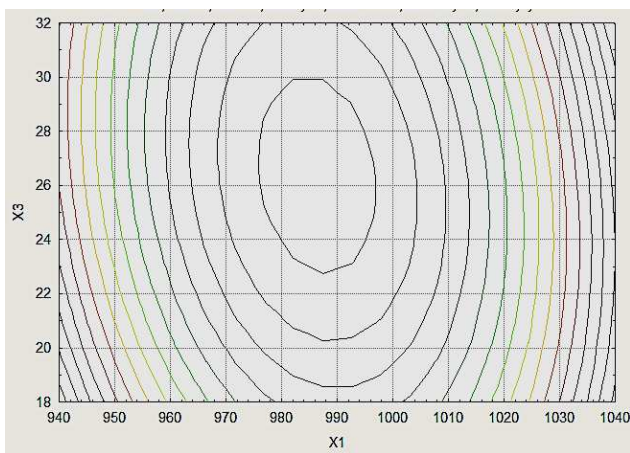
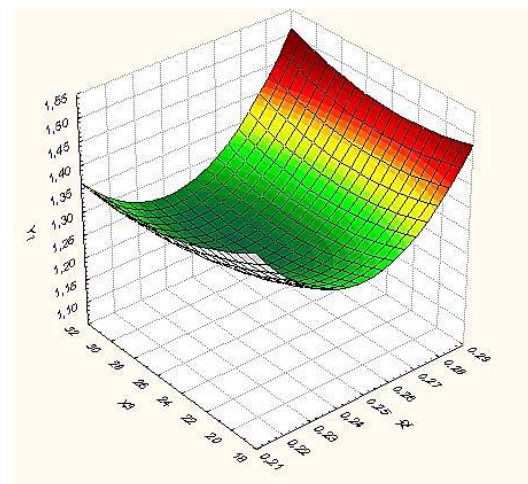
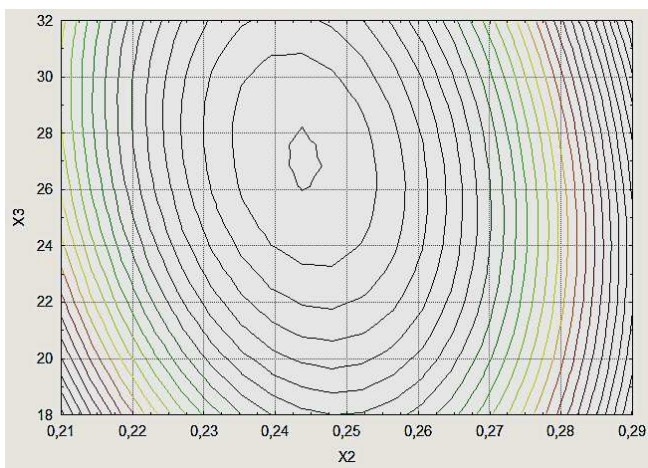
*a**б**в*

Рисунок 4.1 – Энергоемкость процесса измельчения грубых стебельчатых кормов при фиксированном значении одного фактора:

a – X_3 ($h_4 = 24$ мм); *б* – X_2 ($q_c = 0,263$ кг/с); *в* – X_1 ($n_6 = 988$ об/мин)

Поверхности отклика и их двумерные сечения показывают четкую область оптимума, позволяющую определить искомые значения действующих факторов.

Проведенный графоаналитический анализ математической модели с помощью двумерных сечений и решение модели в Mathcad 15 показали оптимальное сочетание изучаемых факторов (см. таблицу 4.3).

Наибольшее влияние на энергоёмкость процесса измельчения в предложенном измельчителе оказывает подача стебельчатых кормов к рабочему органу, о чем свидетельствует максимальный коэффициент регрессии.

Минимально возможная удельная энергоёмкость процесса измельчения составляет 1,08 кВтч/т.

Теоретически определено, что в рациональном интервале частот вращения рабочего органа 950-1030 об/мин минимальная удельная энергоёмкость составляет 1,1 кВтч/т., следовательно, расхождение результатов теории и экспериментов по удельной энергоёмкости составляет 1,8%, что указывает на то, что полученные в результате теоретических исследований математические выражения отражают действительные явления, протекающие в процессе измельчения грубых стебельчатых кормов.

Для сравнения следует отметить, что промышленный измельчитель РСС-6Б производит до 2,0 т/ч сечки грубых стебельчатых кормов и при этом он укомплектован двигателем 7,5 кВт. Данное значение мощности учитывает запас, необходимый для преодоления инерции при пуске и сопротивление холостого хода рабочего органа. Следовательно, полная энергоёмкость РСС-6Б составляет 3,75кВтч/т. С учетом преодоления инерции при пуске и сопротивления холостого хода рабочего органа, предложенного нами измельчителя, его полная энергоёмкость составляет 1,7 кВтч/т. Снижение энергоёмкости составило 45,3%.

Далее необходимо провести более подробное сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

4.3. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса измельчения грубых стебельчатых кормов

При теоретическом обосновании производительности измельчителя выявлено, что его максимальная теоретическая производительность достигается при рациональной частоте вращения измельчающего барабана 990...1030 об/мин. Оптимальная частота вращения измельчающего барабана, полученная в результате проведения многофакторного эксперимента, составляет 988 об/мин., следовательно, расхождение результатов теории и экспериментов, по частоте вращения, не превышает 4%, что полностью согласуется с выбранным доверительным интервалом. При этом максимальная теоретическая производительность измельчителя предлагаемой конструкции достигает 921 кг/ч. Производительность измельчителя, полученная в результате проведения многофакторного эксперимента, составляет 0,263 кг/с или 946,8 кг/ч, следовательно, расхождение результатов теории и экспериментов по производительности составляет 2,8 %.

При теоретическом обосновании затрат мощности на измельчение установлено, что в рациональном интервале частот вращения измельчающего барабана 990...1030 об/мин затраты мощности на измельчение составляют 1,01...1,05 кВт. Оптимальные затраты мощности на измельчение составляют $1,08 \cdot 0,9468 = 1,022$ кВт, следовательно, расхождение результатов теории и экспериментов по затратам мощности не превышает 2,7 %.

Теоретическое значение энергоёмкости процесса измельчения грубых стебельчатых кормов в рациональном интервале частот вращения измельчающего барабана составляет 1,1...1,14 кВтч/т. Оптимальная удельная энергоёмкость, полученная в результате проведения многофакторного

эксперимента, составляет 1,08 кВт·ч/т, следовательно, расхождение результатов теории и экспериментов по энергоёмкости не превышает 5 %.

Таким образом, установлено, что результаты экспериментальных исследований согласуются с данными, полученными расчетным путем по разработанным ранее математическим моделям. Расхождения результатов теории и практики соответствует доверительной вероятности $p=0,95$.

Энергоёмкость процесса измельчения грубых стебельчатых кормов существующими измельчителями значительно выше значения энергоёмкости процесса, осуществляемого новым измельчителем, поэтому полученные результаты подтверждают рабочую гипотезу о повышении эффективности технологического процесса измельчения стебельчатых кормов путем применения рабочего органа, оснащенного свободно подвешенными комбинированными ножами, включающими вертикальные клиновидные и поперечные серповидные лезвия, позволяющие рационально создавать все необходимые упругие и пластические деформации измельчаемого материала при сочетании рубки и скользящего резания.

4.4. Методика инженерного расчета параметров рабочих органов нового измельчителя грубых стебельчатых кормов и рекомендации по его эффективному использованию

В соответствии с предлагаемой нами методикой инженерного расчета параметров нового измельчителя грубых стебельчатых кормов необходимо задаться конструктивной схемой (рисунок 4.2).

Следующим этапом приводится перечень искомым конструктивно-технологических параметров измельчителя. Конструктивно-технологические параметры нового измельчителя, подлежащие определению методом инженерного расчета, основанного на новых теоретических предпосылках:

D_6 – диаметр барабана;

L_6 – длина барабана;

$K_{ГН}$ – количество рядов поперечных лезвий;

b_r – ширина загрузочной горловины, м;

a_r – высота горловины, м;

Δh – высота расположения оси барабана над противорезающей пластиной;

$v_{сл}$ – скорость слоя измельчаемого материала, м/с;

v_6 – окружная скорость барабана, м/с;

α_1 – угол резания (см. рисунок 1.11);

γ_1 – угол заточки ножа;

β_1 – угол установки ножа.

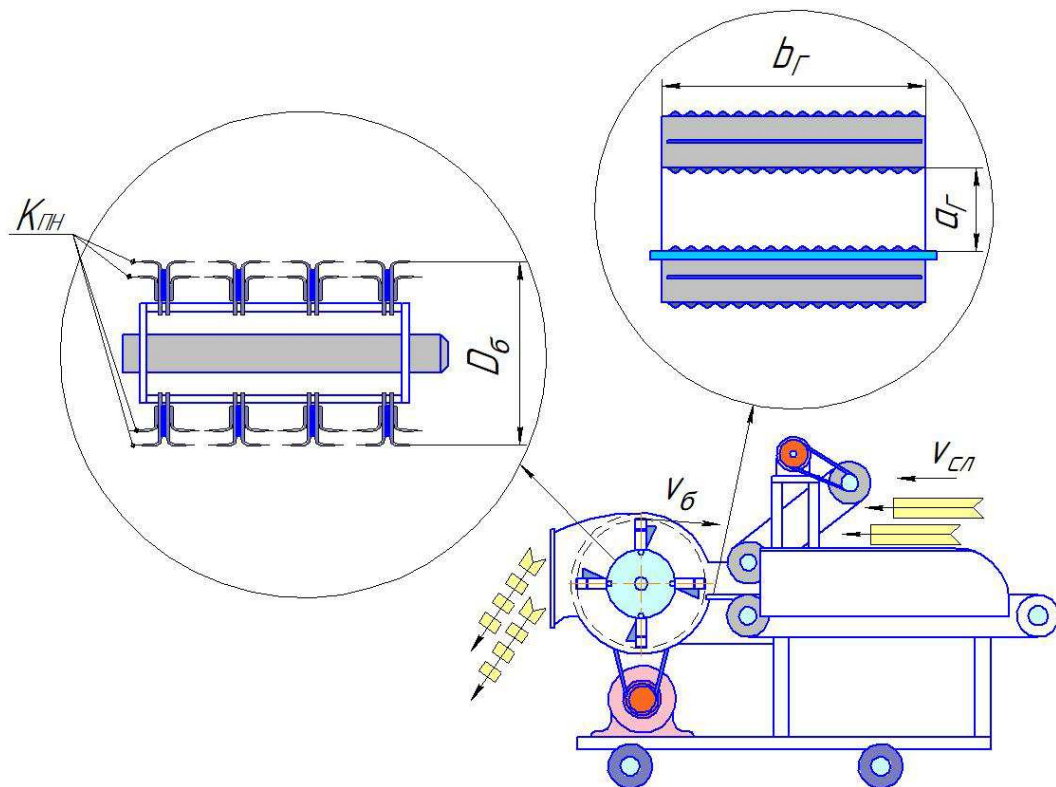


Рисунок 4.2 – Конструктивно-технологическая схема для инженерного расчета параметров нового измельчителя грубых стебельчатых кормов

Методика включает использование общепринятых числовых значений конструктивных и механико-технологических параметров, применяемых при инженерном расчете барабанных измельчителей грубых стебельчатых кормов [62, 71, 92-94, 96, 116]:

- угол заточки ножа, $\gamma_1 = 12-22$ град;
- угол скольжения ножа, $\tau = 17 \dots 30$ град;
- острота лезвия $\delta_0 = 20-40$ мкм;
- при затуплении лезвия допускается острота $\delta_{max} = 100$ мкм;
- ширина стачиваемой части лезвия $\Delta = 250-500$ мкм (рисунок 4.3);
- зазор в режущей паре $\delta = 1-3$ мм;
- объёмная масса стебельчатых кормов, уплотненная питающим аппаратом, $\rho_c = 90-120$ кг/м³;
- модуль упругости материала прожилок $E' = 15-30$ МПа;
- модуль упругости основного материала, $E'' = 3-4$ МПа.

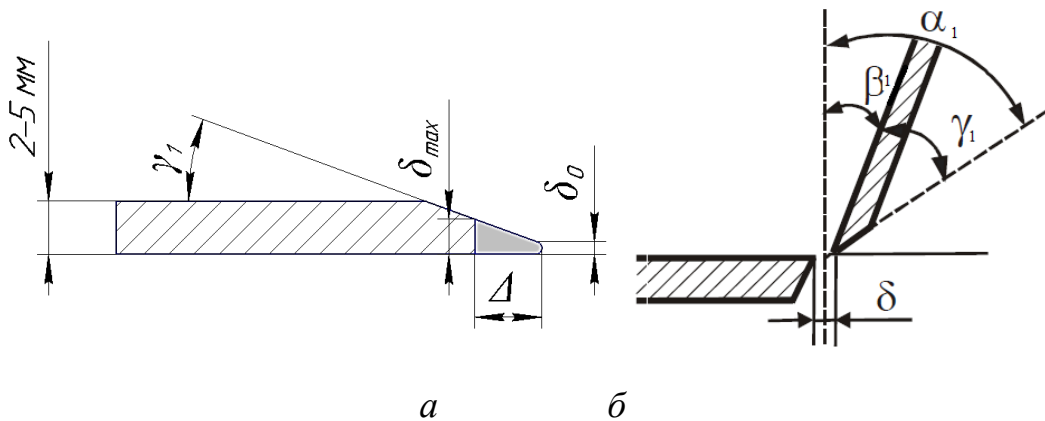


Рисунок 4.3 – Схема к определению параметров лезвия ножа:

a – нож; b – режущая пара

Для обеспечения нормального резания в барабанном измельчителе необходимо создать такие условия, при которых отсутствует отталкивающая сила поперечных серповидных лезвий, препятствующая продвижению измельчаемого слоя материала в камеру измельчения. Такие условия создаются, когда ось барабана расположена выше противорежущей пластины на величину Δh [81, 89]:

$$\Delta h = a_r + \frac{D_b \cdot v_{ст}}{2 \cdot v_b}, \text{ мм}, \quad (4.12)$$

где D_b – диаметр барабана, м;

v_{cl} – скорость слоя измельчаемого материала, м/с;

v_6 – окружная скорость барабана, м/с;

a_r – высота горловины, м.

Основным параметром барабанного измельчителя является радиус барабана [71, 94]:

$$R_6 = \frac{v_{cl} \cdot (b_r \cdot \operatorname{tg} \tau + a_r)}{n_6 \cdot l_0 \cdot 2 \cdot \pi}, \text{ м.} \quad (4.13)$$

где b_r – ширина горловины, м;

τ – угол скольжения, град;

l_0 – длина резки, м.

По заданной производительности, полученной на основании разработанного нами выражения (2.32) и теории, предложенной профессором Н.Е. Резником, рассчитывается высота горловины [94]:

$$a_r = \frac{W_{uv} \cdot 6 \cdot 10^3}{b_r \cdot l_0 \cdot K_{\text{пн}} \cdot \rho_c \cdot n_6}, \text{ м.} \quad (4.14)$$

Угол резания [94]:

$$\alpha_1 = \gamma_1 + \beta_1, \text{ град,} \quad (4.15)$$

где γ_1 – угол заточки ножа;

β_1 – угол установки ножа.

Форма поперечного лезвия представляет собой участок спирали Архимеда (рисунок 4.5), которая раскручивается, удаляясь от точки крепления к вертикальному лезвию в соответствии с таблицей 4.4.

Значения, приведенные в таблице 4.4, позволяют создать лекало для выреза необходимой криволинейной поверхности поперечного лезвия комбинированного ножа из заготовки.

Таблица 4.4 – Данные для построения лекала для выреза криволинейной поверхности поперечного лезвия комбинированного ножа из заготовки

Показатель	Значение										
	$\varphi, ^\circ$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\rho, \text{м}$	0	0,009	0,019	0,028	0,037	0,046	0,055	0,064	0,073	0,082	0,091

Длина поперечного лезвия рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{пл}} = \cos\varphi_{\text{max}} - \rho_0 = 0,091\cos 20^\circ - 0 = 0,086, \text{ м.} \quad (4.16)$$

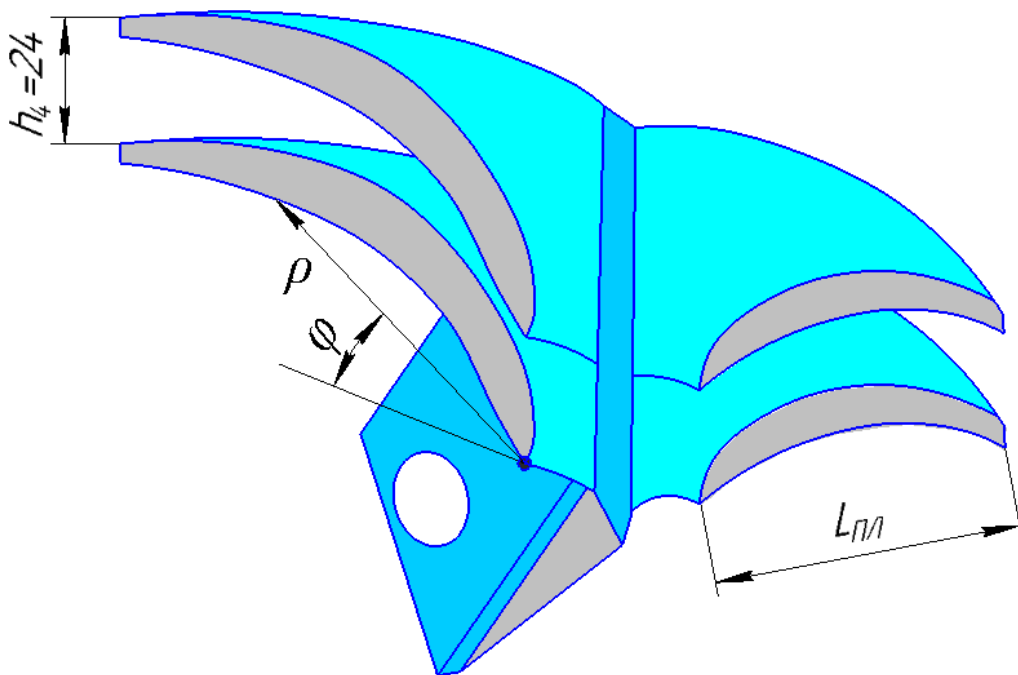


Рисунок 4.4 – К построению криволинейной поверхности поперечного лезвия комбинированного ножа

На основании таблицы 4.4 построено лекало для выреза криволинейной поверхности поперечного лезвия комбинированного ножа из заготовки (рисунок 4.5).

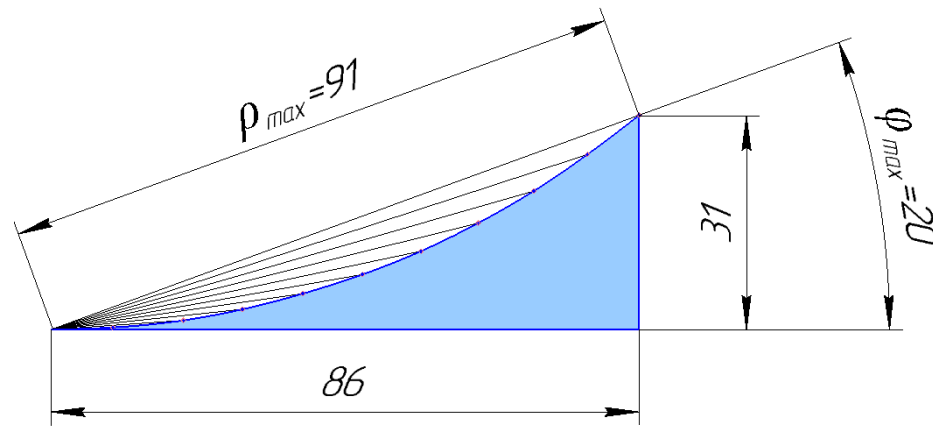


Рисунок 4.5 – Лекало для выреза криволинейной поверхности поперечного лезвия комбинированного ножа из заготовки

Экспериментально-теоретическим путем установлено, что рациональное количество осей подвеса комбинированных ножей составляет 6, причем на 3-х осях (установленных через 120 градусов) устанавливается по 2 ножа на расстоянии друг от друга L_{PMH} и на 3-х осях (также установленных через 120 градусов) устанавливается по 1-му ножу. Следовательно, образовывается следующая схема установки комбинированных ножей. Первая ось подвеса укомплектована двумя ножами, установленными на расстоянии L_{PMH} между крайними точками поперечных серповидных лезвий. Вторая ось подвеса укомплектована одним ножом, расположенным в центре оси. Это, с учетом конструктивных особенностей ножей, дает перекрытие линии действия, равное $L_{ПЕР}$. Далее схема повторяется еще 2 раза. Развертка измельчающего барабана представлена на рисунке 4.6. Схема установки ножей на шести осях подвеса 2:1:2:1:2:1.

Следовательно, две последовательно идущие оси подвеса образуют сплошной ряд ножей, на котором установлены два уровня поперечных лезвий на расстоянии 24 мм друг от друга, то есть количество полных рядов комбинированных ножей – три (две оси подвеса образуют полный ряд).

Из вышеизложенного следует:

$$L_6 = 2L_{НОЖ} + 2H_{ТЕХ} + L_{PMH}, \text{ мм} \quad (4.17)$$

$$L_{НОЖ} = 2L_{ПЛ} + 5, \text{ мм}, \quad (4.18)$$

$$L_{PMH} = 0,5L_{ПЛ}, \text{ мм} \quad (4.19)$$

Зазор между ножами и стенкой корпуса $H_{ТЕХ}$ целесообразно принять равным 10 мм, что исключит касание ножом стенки корпуса измельчителя при возникновении вибрации барабана в условиях работы при перегрузках.

На основании вышеизложенного, измельчитель стебельчатых кормов, обеспечивающий производительность 0,263 кг/с (946,8 кг/ч), должен обладать рабочим органом с параметрами, приведенными в таблице 4.5.

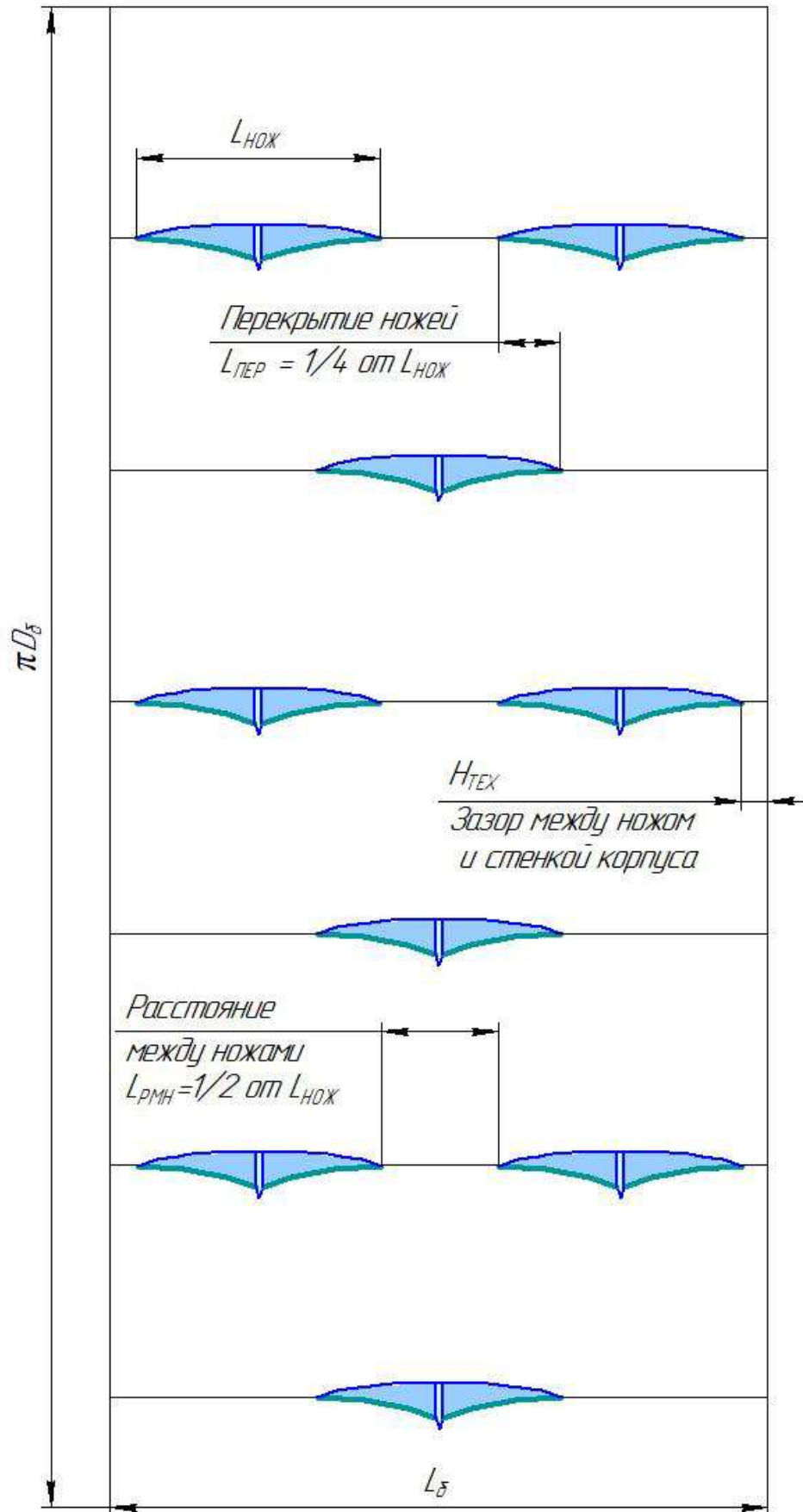


Рисунок 4.6 – Развертка измельчающего барабана

Таблица 4.5 – Параметры рабочего органа нового измельчителя стебельчатых кормов

Параметр	Значения
D_6 – диаметр барабана в рабочем состоянии, мм.....	500
L_6 – длина барабана, мм.....	450
K_{KH} – количество комбинированных ножей.....	9
$K_{ПН}$ – количество поперечных лезвий	36
$K_{ПРKH}$ – количество полных рядов комбинированных ножей (на двух последовательных осях подвеса), штук.....	3
$L_{НОЖ}$ – конструктивная длина комбинированного ножа, мм.....	177
$L_{ПН}$ – длина одного поперечного лезвия.....	86
b_T – ширина загрузочной горловины, м.....	450
a_T – высота загрузочной горловины, м.....	40
Δh – высота расположения оси барабана над противорежущей пластиной, мм.....	52
$v_{сл}$ – скорость слоя измельчаемого материала, м/с.....	1,2
v_6 – окружная скорость барабана, м/с.....	25,9
β_1 – угол установки ножа (конструкционный параметр), градусов.....	5
α_1 – угол резания, градусов	25
τ – угол скольжения ножа, градусов	20

Выводы

1. В результате проведения и обработки результатов многофакторного эксперимента методом Бокса-Бенкина получена математическая модель в раскодированной форме (4.1), адекватно описывающая процесс измельчения грубых стебельчатых кормов новым рабочим органом. Согласно данной модели, наибольшее влияние на энергоемкость процесса оказывает подача стеблей в измельчитель.

2. Графоаналитический анализ математической модели с помощью двухмерных сечений и решение модели показали оптимальное сочетание изучаемых факторов:

- частота вращения рабочего органа 988 об/мин;
- подача компонентов в измельчитель 0,263 кг/с;
- зазор между поперечными серповидными лезвиями комбинированных ножей 24 мм.

При этом удельная энергоемкость процесса измельчения составит 1,08 кВт·ч/т, производительность измельчителя 946,8 кг/ч, а длина сечки не превысит 50 мм.

Расхождение результатов теоретических исследований и экспериментальных данных, полученных при многофакторном эксперименте не превышает 5%.

3. Эксперименты и инженерный расчет, объединяющий существующую и новую теорию измельчения грубых стебельчатых кормов, позволили получить наиболее рациональные размерные и технологические параметры работы предложенного измельчителя грубых стебельчатых кормов:

- диаметр барабана в рабочем состоянии 500 мм;
- длина барабана 450 мм;

- высота расположения оси барабана над противорежущей пластиной 52 мм;
- количество осей подвеса ножей 6;
- количество комбинированных ножей 9;
- схема установки ножей на шести осях подвеса 2:1:2:1:2:1;
- конструктивная длина комбинированного ножа 177 мм;
- длина одного поперечного лезвия 86 мм;
- кривизна поперечного лезвия обеспечивает угол скольжения при резании равным 20 градусов, при этом угол резания, с учетом угла заточки лезвия, составляет 25 градусов.

4. Применение нового измельчителя в сравнении с промышленным измельчителем РСС-6Б позволяет снизить полную энергоемкость на 45,3%. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические предпосылки по исследованию технологического процесса измельчения стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого оснащен свободно подвешенными комбинированными ножами, включающими вертикальные клиновидные и поперечные серповидные лезвия, позволяющие рационально создавать все необходимые упругие и пластические деформации измельчаемого материала при сочетании рубки и скользящего резания.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ

5.1. Расчет экономической эффективности применения измельчителя стебельчатых кормов

Перспектива применения измельчителя стебельчатых кормов, предложенного на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований, может быть оценена экономической эффективностью его использования. Этот показатель определяется путем сопоставления затрат на выполнение технологического процесса измельчения стебельчатых кормов новым измельчителем и базовым образцом.

Экономические показатели нового измельчителя стебельчатых кормов определялись по стандартной методике определения экономической эффективности использования техники в народном хозяйстве [73-75, 86].

В качестве базового образца (объекта сравнения) был принят измельчитель РСС-6Б. Базовый образец, как и новый измельчитель, способен измельчать стебельчатые корма. Измельчитель РСС-6Б производится серийно, его стоимость на 01.04.2018 года составляет 56000 руб. Для определения оптовой цены нового измельчителя был применен упрощенный способ расчета однотипных машин по сопоставимому весу [61, 64, 75, 79]:

$$Ц_{\text{б}} = Ц_{\text{н}} \frac{m_{\text{у.н.}}}{m_{\text{у.б.}}}, \text{руб.}, \quad (5.1)$$

где $Ц_{\text{б}}$, $Ц_{\text{н}}$ – оптовая цена базового образца и новой машины, соответственно, руб.;

$m_{\text{у.б.}}$, $m_{\text{у.н.}}$ – масса базового образца и новой машины соответственно, кг.

Исходные данные для расчета экономической эффективности нового измельчителя стебельчатых кормов приведены в табл. 5.1.

Экономическая эффективность от внедрения новой техники оценивается с помощью годового экономического эффекта и срока окупаемости дополнительных капиталовложений.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности нового измельчителя грубых стебельчатых кормов

Показатели	Обозначения	Единица измерения	Значение	
			РСС-6Б	Новый измельчитель
1. Масса	m	кг	770	300
2. Оптовая цена	C	руб	56000	24000
3. Среднегодовая загрузка	T	ч	500	500
4. Производительность	Q	т/ч	2,0	0,9468
5. Мощность применяемого электродвигателя	N	кВт	7,5	2,2
Марка электродвигателя			АИР 112 М2	АИР 80 В2
7. Норма отчислений:	P_A	%	10	10
а) на амортизацию	$P_{ТО и ТР}$	%	10	10
б) на техническое обслуживание и ремонт				
8. Коэффициент перевода оптовой цены в балансовую	-	-	1,1	1,1
9. Обслуживающий персонал	-	чел	1	1
10. Зарботная плата (тарифная ставка)		руб./чел·ч	30	30

Полученные выше результаты, а также основные технико-экономические показатели для базового и нового измельчителя грубых стебельчатых кормов использованы в качестве исходных данных для расчета годового экономического эффекта и срока окупаемости дополнительных капиталовложений.

Грубые стебельчатые корма – одна из самых важных групп сельскохозяйственных культур не только в России, но и за рубежом. Они широко используются в кормлении различных групп животных и являются высококачественным кормом для большинства сельскохозяйственных животных и птиц [53, 56].

Результаты расчета годового экономического эффекта представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчета годового экономического эффекта

Показатели	Обозначение	Единица измерения	Значение	
			РСС-6Б	Новый измельчитель
1. Материалоемкость	$M = m / Q$	кг·ч/т	385	317
2. Полная энергоемкость машины со стандартным электродвигателем	$\mathcal{E} = N / Q$	кВт·ч/т	3,75	2,33
3. Прямые издержки, в том числе:	$I = A + P_{mo} + E + 3n$	руб./т	72,25	57,20
- отчисления на амортизацию	$A = \frac{1,1 \cdot Ц \cdot P_A}{Q \cdot T \cdot 100\%}$	руб./т	9,3	8,4
- отчисления на ремонт и техническое обслуживание	$P_{то} = \frac{1,1 \cdot Ц \cdot P_{тоитр}}{Q \cdot T \cdot 100\%}$	руб./т	6,2	5,6
- расходы на электроэнергию	$E = (N \cdot Ц_{э}) / Q$	руб./т	19,25	11,62
- расходы на заработную плату	$3_n = 3_q / Q$	руб./т	37,50	31,58
4. Удельные капиталовложения	$K = \frac{1,1 \cdot Ц}{Q \cdot T}$	руб./т	61,6	55,8
5. Сумма приведенных затрат	$C = I + E_H \cdot K$	руб./т	84,57	68,36
6. Годовой экономический эффект	$\mathcal{E}_e = (C_B - C_H) \cdot Q_H \cdot T_H$	руб./т	-	7674
7. Срок окупаемости капиталовложений, лет	$T = Ц_H / \mathcal{E}_e$	лет	-	3,12

Из результатов расчета видно, что источником получения экономического эффекта является снижение затрат на электроэнергию (экономия 7,63 рубля на тонну измельченных кормов), при снижении материалоемкости и энергоемкости процесса измельчения стебельчатых кормов.

Расчет экономической эффективности нового измельчителя стебельчатых кормов в сравнении с измельчителем РСС-6Б показал:

- годовой экономический эффект составляет 7674 руб.;
- срок окупаемости капиталовложений 3,12 года.

5.2. Рекомендации по использованию измельчителя стебельчатых кормов в производстве

В кормовом балансе животноводческих ферм значительную часть занимают грубые стебельчатые корма [53, 56, 58, 60, 112, 124], так как они обладают хорошими кормовыми качествами [53, 60].

К грубым стебельчатым кормам относят сухие стебли кукурузы, сорго и т.д. В рационе животных в зимний период корма этих видов могут составлять 25-30% [53, 56, 58, 60, 112, 124]. Подготовка грубых стебельчатых кормов к скармливанию состоит в измельчении, что повышает поедаемость и улучшает технологические свойства корма.

Важную роль в процессе приготовления кормовых смесей играет измельчающая техника, среди которой особое место занимают измельчители грубых стебельчатых кормов.

Разработанный измельчитель (полезная модель патент № 69756 от 10.05.2012) грубых стебельчатых кормов может использоваться в следующих вариантах:

- в кормоприготовительных линиях;
- как мобильный измельчитель грубых стебельчатых кормов для фермерских хозяйств;
- как измельчитель в кукурузоуборочных комбайнах.

Рекомендуемая схема расположения нового измельчителя стебельчатых кормов в кормоцехах хозяйств представлена на рисунке 5.1.

Рекомендуемые режимы измельчения стебельчатых кормов при использовании измельчителя в кормоприготовительной линии:

- частота вращения 988 мин⁻¹;
- размер ячейки калибровочного решета 40 x 40;
- рациональная подача в камеру измельчения 0,263 кг/час;

– зазор между поперечными серповидными лезвиями комбинированных ножей 24 мм.

При этом удельная энергоемкость процесса измельчения составит 1,08 кВт·ч/т, производительность измельчителя 946,8 кг/ч, а длина сечки не превысит 50 мм.

Новый измельчитель стебельчатых кормов оснащен колесами, что позволяет легко перемещать его в кормоцехе.



Рисунок 5.1 – Схема расположения измельчителя стебельчатых кормов в кормоцехах хозяйств: 1 – бункер-питатель; 2 – измельчитель стебельчатых кормов; 3 – транспортер сечки; 4 – бункер-дозатор; 5 – мобильный смеситель кормораздатчик.

Рекомендации по использованию разработанного измельчителя стебельчатых кормов, а также соответствующее методическое обеспечение и конструкция используются в учебном процессе на кафедре механизации производственных процессов в животноводстве Луганского национального аграрного университета.

Выводы

1. Технико-экономический анализ технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов новым и промышленным измельчителем РСС-6Б показал, что экономический эффект достигается за счет снижения прямых эксплуатационных издержек (отчислений на амортизацию, на ТО и текущий ремонт, затрат на электроэнергию и других расходов).

2. Применение в производстве предлагаемого измельчителя грубых стебельчатых кормов позволяет получить годовой экономический эффект 7674 руб., а срок окупаемости первоначальных капитальных вложений составляет 3,12 года.

3. Разработаны рекомендации по эффективному использованию измельчителя грубых стебельчатых кормов в стационарных кормоцехах, которые переданы животноводческим предприятиям Антрацитовского района Луганской Народной Республики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для измельчения грубых стебельчатых кормов наиболее перспективным является барабанный тип рабочего органа, поскольку он хорошо согласуется с питающим устройством и позволяет эффективно применять как ножи, так и шарнирно подвешенные молотки различной конструкции.

2. Для измельчения грубых стебельчатых кормов наиболее перспективным является скользящее резание, поскольку данный вид измельчения реализован в эффективных барабанных измельчителях, не требует применения сложных рабочих органов и позволяет снизить энергоемкость процесса измельчения за счет рационально распределения сил, действующих на измельчаемые стебли. Кроме того, конструкция рабочих органов, обеспечивающих скользящее резание, позволяет снизить материалоемкость барабанных измельчителей.

3. Повысить эффективность процесса измельчения грубых кормов с прочным стеблем (например, кукуруза, сахарное сорго, сорго-суданковый гибрид и т.д.) можно путем применения рабочего органа, одновременно обеспечивающего ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами, включающими вертикальные клиновидные и поперечные серповидные лезвия.

4. Процесс измельчения стеблей предложенным рабочим органом представляет собой отсечение частиц определенной длины с их одновременным расщеплением на части. Данные явления описаны новыми математическими моделями, учитывающими строение измельчаемых стеблей, изменение формы их поперечного сечения при контакте с лезвиями, а также кривизну режущей кромки поперечных лезвий комбинированных ножей.

5. Новые математические модели показали, что максимальная теоретическая производительность измельчителя предлагаемой конструкции

909-921 кг/ч достигается в диапазоне частот 950-1030 об/мин., однако превышение частоты вращения рабочего органа выше 990 об/мин. нецелесообразно, поскольку второй ярус лезвий на комбинированных ножах начинает работать неэффективно из-за увеличенного угла его установки после удара первым ярусом о стебель. Кроме того, на комбинированном органе в диапазоне частот вращения рабочего органа 950–1030 об/мин обеспечивается режим минимальных затрат мощности на измельчение, которые составляют 1,01-1,1 кВт.

6. В рациональном режиме измельчения теоретическая мощность, потребная на холостой ход рабочего органа составит 0,331 кВт, необходимая теоретическая мощность электродвигателя, с учетом коэффициента преодоления инерции при пуске, составит 1,61 кВт, а теоретическая энергоёмкость процесса измельчения минимальная и составляет 1,1-1,21 кВтч/т.

7. Экспериментальным путем установлены следующие механико-технологические характеристики измельчаемых стеблей кукурузы:

– статический коэффициент трения внешней оболочки исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,541;

– статический коэффициент трения внутреннего материала исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,449;

– усредненное значение статического коэффициента трения составляет 0,510;

– динамический коэффициент трения внешней оболочки исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,38;

– динамический коэффициент трения внутреннего материала исследуемых стеблей кукурузы имеет значение 0,32;

– усредненное значение динамического коэффициента трения составляет 0,35;

– соотношения площадей армирующего и основного слоя материала в поперечном разрезе стебля кукурузы составляет 1:3,4.

8. В результате проведения и обработки результатов многофакторного эксперимента получено оптимальное сочетание изучаемых факторов:

- частота вращения рабочего органа 988 об/мин;
- подача компонентов в измельчитель 0,263 кг/с;
- зазор между поперечными серповидными лезвиями комбинированных ножей 24 мм.

При этом удельная энергоемкость процесса измельчения составит 1,08 кВт·ч/т, производительность измельчителя 946,8 кг/ч, а длина сечки не превысит 50 мм.

9. Эксперименты и инженерный расчет, объединяющий существующую и новую теорию измельчения грубых стебельчатых кормов, позволили получить наиболее рациональные размерные и технологические параметры работы предложенного измельчителя грубых стебельчатых кормов:

- диаметр барабана в рабочем состоянии 500 мм;
- длина барабана 450 мм;
- высота расположения оси барабана над противорежущей пластиной 52 мм;
- количество осей подвеса ножей 6;
- количество комбинированных ножей 9;
- схема установки ножей на шести осях подвеса 2:1:2:1:2:1;
- конструктивная длина комбинированного ножа 177 мм;
- длина одного поперечного лезвия 86 мм;
- кривизна поперечного лезвия обеспечивает угол скольжения при резании равным 20 градусов, при этом угол резания, с учетом угла заточки лезвия, составляет 25 градусов.

10. Технико-экономический анализ технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов новым и промышленным измельчителем РСС-6Б показал, что экономический эффект достигается за счет снижения прямых эксплуатационных издержек (отчислений на амортизацию, на ТО и текущий ремонт, затрат на электроэнергию и других расходов). Применение в производстве предлагаемого измельчителя грубых стебельчатых кормов, в сравнении с измельчителем РСС-6Б, позволяет получить годовой экономический эффект 7674 руб., а срок окупаемости первоначальных капитальных вложений составляет 3,12 года. Применение нового измельчителя в сравнении с промышленным измельчителем РСС-6Б позволяет снизить полную энергоемкость на 45,3%.

11. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические предпосылки по исследованию технологического процесса измельчения стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого оснащен свободно подвешенными комбинированными ножами, включающими вертикальные клиновидные и поперечные серповидные лезвия, позволяющие рационально создавать все необходимые упругие и пластические деформации измельчаемого материала при сочетании рубки и скользящего резания.

12. Расхождение результатов теоретических исследований и полученных экспериментальных данных не превышает допустимые 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абилжанов, Т. Исследование и обоснование параметров рабочих органов измельчителя грубых кормов молоткового типа: автореф. дис. канд. техн. наук: 05 / Абилжанов Токтар. – Алма-Ата, 1979. – 24 с.
2. Абилжанов, Т. Совершенствование технологических процессов и разработка технологических средств для приготовления стебельчатых кормов в овцеводстве: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.20.01 / Абилжанов Токтар. – Алма-Ата, 1994. – 48 с.
3. Адлер, Ю.И. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.И. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
4. Алдошин, Н.В. Пути повышения качества работы косилок и жаток / Н.В. Алдошин, А.А. Золотов, Н.А. Лылин // Вестник ФГОУ ВПО Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. – 2017. – № 4(80). – С. 7–13.
5. Алдошин, Н.В. Совершенствование конструкции сегментно-пальцевых режущих аппаратов / Н.В. Алдошин, А.А. Золотов, Н.А. Лылин // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 6(73). – С. 46–53.
6. Алешкин, В.Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов: дис. докт. техн. наук: 05.20.01 / Алешкин Владимир Романович. – Киров, 1995. – 412 с.
7. Астровский, А.И. Высшая математика: учебно-методический комплекс / А.И. Астровский, Е.В. Воронкова, О.П. Степанович. – Минск: Изд-во МИУ, 2009. – 383 с.
8. Баврин, И.И. Высшая математика: Учебник по естественно-научным направлениям и специальностям / И.И. Баврин. – М.: Академия, 2010. – 611 с.
9. Балдин, К.В. Высшая математика: учебник / К.В. Балдин, В.Н. Башлыков, А.В. Рукосуев. – М.: Флинта, МПСИ, 2010. – 359 с.

10. Бать, М.И Теоретическая механика в примерах и задачах. Учебное пособие для вузов. В 2 т. / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. – М.: Наука, 2007. – Т. 1 – 2.

11. Бахарев, Д.Н. Повышение эффективности технологического процесса обмолота и разработка конструкции молотилки початков кукурузы: дис. кандидата техн. наук: 05.05.11 / Бахарев Дмитрий Николаевич. – Луганск, 2007. – 188 с.

12. Белонучкин, В. Е. Курс общей физики: учебник для вузов. В 2 т. Т. 2. Квантовая и статистическая физика. Термодинамика. / В. Е. Белонучкин, Д.А. Заикин, Ю.М. Ципенюк; под ред Ю.М. Ципенюка. – М.: Физматлит, 2007. – 608 с.

13. Белянчиков, Н.Н. Механизация животноводства / Н.Н. Белянчиков, А.И. Смирнов. – М.: Агропромиздат, 1989.

14. Бёрд, Д. Инженерная математика / Джон Бёрд. М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2008. – 544 с.

15. Боровиков, В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. Боровиков, 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.

16. Брагинец, Н.В. Изучение конструктивно-технологических параметров рабочего органа для измельчения грубых и стебельчатых кормов / Н.В. Брагинец, А.А. Вертий // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 132. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – С. 223-227.

17. Брагинец, Н.В. К методике исследований некоторых механико-технологических свойств початков и зерна основных подвидов кукурузы / Н.В. Брагинец, Д.Н. Бахарев, В.Н. Демченко // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. - Луганськ: ЛНАУ, 2011. – № 29. – С. 220-232.

18. Брагинец, Н.В. Повышение эффективности технологического процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов / Н.В. Брагинец, А.А. Вертий // Наукові праці ПФ НУБіП України «КАТУ». Серія «Технічні науки». Випуск 153. – Сімферополь: ВД «АРІАЛ», 2013. – С. 96-99.

19. Брагинец, Н.В. Экспериментальные исследования процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов измельчителем с комбинированными ножами / Н.В. Брагинец, А.А. Вертий // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 45, ч. II – Кіровоград: КНТУ, 2015. – С. 129-134.

20. Бремер, Г.И. Основы теории резания лезвием и расчет режущих машин животноводческих ферм / Г.И. Бремер – М.: ВСХИЗО, 1963. – 75 с.

21. Будашов, И.А. Обоснование параметров ротационно-дискового режущего аппарата для резания толстостебельных культур: автореферат дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» / Будашов Игорь Александрович– Барнаул, 2013. – 22 с.

22. Бурмистрова, М.В. Физико-механические свойства сельскохозяйственных растений / Бурмистрова М.В. – М.: Сельхозгиз, 1956. – 145 с.

23. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики: Учеб. пособие для студентов вузов по техн. спец.: в 2 т./ Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – СПб.: Лань, 2008. – Т. 1-2.

24. Бухман, Н.С. Упражнения по физике: учебное пособие (для практических занятий и самостоятельной работы студентов вузов). / Н.С. Бухман. – СПб.: Лань, 2008. – 96 с.

25. Буянов, А.И. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. (Методы исследования, приборы, характеристики) / А.И. Буянов, Б.А. Воронюк – М.: Колос, 1970. – 423 с.

26. Варданян, Г.С. Сопротивление материалов с основами упругости и пластичности: учебник / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков; Под ред. Г.С. Варданяна и Н.М. Атарова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 638 с. – С. 12.

27. Вертий А.А. Результаты экспериментально-теоретических исследований производительности измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно-подвешенными комбинированными ножами / А.А. Вертий // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке», посвященной 30-летию кафедры технической механики конструирования машин. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. – С. 34-39.

28. Винарский, М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

29. Вольвак, С.Ф. Анализ математической модели технологического процесса измельчения стебельчатых кормов [Текст] // С.Ф. Вольвак, В.И. Шаповалов / Известия Международной академии аграрного образования. – Выпуск 25 (2015). – Том 1. – Санкт-Петербург: СПб РО МААО, 2015. – С. 90-93.

30. Вольвак, С.Ф. Исследование измельчающих аппаратов незерновой части урожая зерновых культур с шарнирной подвеской ножей на барабане [Текст] // С.Ф. Вольвак, В.И. Шаповалов / Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – Белгород: ООО Издательско-полиграфический центр «ПОЛИТЕРРА», 2015. – № 3 (7). – С. 9-16.

31. Вольвак, С.Ф. Теоретические исследования измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – Белгород: ООО Издательско-полиграфический центр «ПОЛИТЕРРА», 2016. – № 3 (11). – С. 24-34.

32. Вольвак, С.Ф. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий, Е.Е. Корчагина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – Белгород: ООО Издательско-полиграфический центр «ПОЛИТЕРРА», 2017. – № 3 (13). – С. 23-32.

33. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – Москва: АСТ: Астрель, 2010. – 703 с.

34. Гевко, Б.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б.М. Гевко, Р.М. Рогатынский – Львов: Высшая шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 175 с.

35. Геррман, Х. Шнековые машины в технологии / Геррман Х. – Л.: Химия, 1975. – 232 с.

36. Гноевой, В.И. Справочник по качеству кормов. / В.И. Гноевой. Под ред. А.А. Омеляненко. – К.: Урожай, 1985. – 192 с.

37. Горячкин, В.П. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин / В.П. Горячкин //собр. соч. – Т. 2. – М.: Сельхозгиз, 1936. – 530 с.

38. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в семи томах. Том 5. / под ред. докторов с.-х. наук И.Ф. Василенко, В.А. Желиговского, Н.Д. Лучинского, С.В. Полетаева и канд. с.-х. наук К.А. Полевицкого. – М.: Сельхозгиз, 1940.

39. ГОСТ 13496.3-92 – Методика определения влажности материала

40. Григорьев, А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.

41. Гулевский, В.А. Краткий курс теоретической механики: учебное пособие / В.А. Гулевский, В.П. Шацкий. – Воронеж: ФГОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2009. – 178 с.

42. Гулевский, В.А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов / В.А. Гулевский, А.А. Вертий // Вестник

Воронежского государственного аграрного университета. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – №3 (58). – С. 120-128.

43. Гулевский, В.А. Результаты экспериментальных исследований производительности измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами и энергетики процесса измельчения / В.А. Гулевский, А.А. Вертий, Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Роль аграрной науки в развитии АПК РФ. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Ч. I.. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 220-226.

44. Гусак, А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Минск: ТетраСистема, 1999. – 640 с.

45. Гутер, Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М.: Наука, 1970. – 432 с.

46. Девяткин, А.И. Рациональное использование кормов. / А.И. Девяткин – М.: Росагропромиздат, 1990. – 256 с.

47. Демин, О.В. Совершенствование методов расчета и конструкций лопастных смесителей: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (химической промышленности)» / Демин Олег Владимирович. – Тамбов, 2003 – 12 с.

48. Демченко, В.Н. Повышение эффективности процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов // В.Н. Демченко, А.А. Вертий. – Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету [Електронний ресурс] – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип.1. – Т. 3. – С. 74-79.

49. Есепчук, Н.И. Экспериментальное исследование процесса измельчения листостебельной массы кукурузы измельчителем с осевым питанием / Н.И. Есепчук // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Вып. 46 – К.: Урожай, 1979. – С. 30-33.

50. Завалишин, Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев. – М.: Колос, 1982. – 231 с.

51. Завражнов, А.И. Механизация приготовления и хранения кормов / А.И. Завражнов, Д.И. Николаев. – М.: Агропромиздат, 1990.

52. Заика, П.М. Избранные задачи земледельческой механики / П.М. Заика – К.: Издательство УСХА, 1992. – 512 с.

53. Иванов, Ю.А. Современные механизированные технологии заготовки стебельчатых кормов / Ю.А. Иванов, В.К. Скоркин // Кормопроизводство. – 2013. – № 5. – С. 46-48.

54. Иванченко, Ф.К. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин / Ф.К. Иванченко – К.: Вища школа, 1978. – 578 с.

55. Испытание различных материалов на ударную вязкость // (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://www.soprotmat.ru/lab13.htm>

56. Калашников, А.П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А.П. Калашников [и др.] 3-е изд. перераб. и доп. – Справочник. – М.: Россельхозакадемия, 2003. – 456 с.

57. Карпов, В.В. Анализ сил взаимодействия рабочих органов гофрошечных барабанов очистителя кормовых корнеплодов с объектами очистки / В.В. Карпов, В.А. Гулевский // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – №2 (53). – С. 121-127.

58. Классификация кормов и характеристика их питательной ценности / (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://fermer02.ru/animal/5150-klassifikaciya-kormov-i-harakteristika-ih-pitatelnoy-cennosti.html>.

59. Коба, В.Г. Механизация и технология производства продукции животноводства / В.Г. Коба, Н.В. Брагинец, Д.Н. Мурусидзе и др.; под. ред. Н.В Брагинца – М.: Колос, 1999.

60. Корма для сельскохозяйственных животных и способы их подготовки к скармливанию / (Электронный ресурс) – Режим доступа:

<http://veterinarua.ru/zhivotnovodstvo/1359-korma-dlya-selskokhozyajstvennykh-zhivotnykh-i-sposoby-ikh-podgotovki-k-skarmlivaniyu.html>.

61. Косачев, Г.Г. Экономическая оценка сельскохозяйственной техники / Г.Г. Косачев. – М.: Колос, 1978. – 240 с.

62. Крамаренко, Л.П. Сопротивление растений перерезанию / Л.П. Крамаренко // Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин, т. 2, под общ. ред. В.П. Горячкина. – М.: Сельхозгиз, 1936. – 536 с.

63. Красников, В.В. Подъемно-транспортные машины / В.В. Красников – М.: Колос, 1987. – 272 с.

64. Краюхин, Г.А. Экономическая эффективность изобретений и рационализаторских предложений / Г.А. Краюхин. – Л.: Лениздат, 1983. – 120 с.

65. Кукта, Г.М. Механизация и автоматизация животноводства / Г.М. Кукта, А.Л. Колесник, С.Г. Кукта – К.: Высшая школа, 1990. – 335 с.

66. Курнаков, Н.С. Давление истечения и твердость пластических тел / Н.С. Курнаков, С.Ф. Жемчужный // Журнал физико-химического общества. – 1963. – №45. – С. 24–26.

67. Луканкин, Г.Л. Высшая математика: Учебник / [Г.Л. Луканкин, Н.Н. Мартынов, Г.А. Шадрин и др.]- М.: Высш. Шк., 2004. – 584 с.

68. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.

69. Майсурян, Н.А. Практикум по растениеводству / Н.А. Майсурян. – М.: Колос, 1970. – 446 с.

70. Машины и технологии в животноводстве // (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://www.stgau.ru/company/personal/user/7382/files/lib>.

71. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С.В. Мельников – Л.: Колос, Ленинград. отделение. 1978. – 560 с.

72. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.П. Алешкин, П.М. Рощин. – Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с.

73. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений / Госагропром УССР. – К.: Урожай, 1986. – 117 с.

74. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. – М.: Минсельхозпром России, 1998. – 220 с.

75. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования: Официальное издание. Утверждено: Госстрой России, Мин-во экономики РФ, Мин-во финансов РФ, Госкомпром России. № 7 - 12/47, 31 марта 1994. – М.: Информэлектро, 1994.

76. Механизация и технология производства продукции животноводства / [Коба В.Г., Брагинец Н.В., Мурусидзе Д.Н., Некрашевич В.Ф. и др.]; под. ред. Брагинца Н.В. – М.: Колос, 1999.

77. Мещерский, И.В. Задачи по теоретической механике: Учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по техн. спец. / И.В. Мещерский. – СПб.: Лань, 2009. – 447 с.

78. Механические ткани / (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://www.biologyguide.ru/gbids-386-1.html>.

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

80. Мухин, В.А. Механизация приготовления кормов / В.А. Мухин Саратов: Сарат. гос. с.-х. акад., 1994. – 159 с.

81. Назаров, С.И. Усовершенствованный измельчитель-смеситель кормов / С.И. Назаров, О.А. Бобер. – Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1989. – № 5. – С. 39–40.

82. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 365 с.

83. Одинг, А.И. О предельном напряжении релаксации / А.И. Одинг, Т.И. Волкова // Релаксация и ползучесть металлов: сборник статей. – М.: Машгиз, 1951. – С. 38–42.

84. Определение удельной ударной вязкости // (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://svyatik.org/svarka-609.html>.

85. Особов, В.И. Сеноуборочные машины и комплексы / В.И. Особов, Г.К. Васильев – М: Машиностроение, 1983. – 304 с.

86. Оськин, С.В. Экономическое обоснование организационно-технических мероприятий в курсовых и дипломных проектах: учебное пособие / С.В. Оськин, В.Я. Хорольский, О.А. Гончарова, А.И. Вандтке. – Краснодар: Изд-во КГАУ, 2008. – 108 с.

87. Отдел покрытосеменных (цветковых): Механические ткани / (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://pharmspravka.ru/farmatsevticheskie-vorosyi-i-otvetyi/study/otdel-pokrytosemennyx-cvetkovyx-mexanicheskie-tkani.html>.

88. Передня, В.И. Механизация приготовления кормосмесей для крупного рогатого скота / В.И. Передня. – Минск, Урожай, 1990. – 152 с.

89. Передня, В.И. Обоснование параметров измельчителя-смесителя кормов вертикального типа. Межвед. темат. сб. – Вып. 27 / В.И. Передня ЦНИИМЭСХ Нечерн. зоны СССР. – Мн.: Урожай, 1984. – С.20–24.

90. Пехур, Е.Г. К вопросу о торцевом и наклонном срезе стеблей / Е.Г. Пехур. – Труды ВИСХОМ. – Ростов н/Д.: 1972. – 215 с.

91. Пустыгин, М.А. Теория и технологический расчет молотильных устройств / М.А. Пустыгин – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

92. Резник, Е.И. Механизация приготовления кормов на животноводческих фермах и комплексах / Е.И. Резник, Е.В. Алябьев. – М.: ВНИИТЭИСХ, 1983. – 60 с.

93. Резник, Н.Е. Силосоуборочные комбайны: теория и расчет / Н.Е. Резник – М.: Машиностроение, 1964. – 446 с.

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

95. Роговой, В.Д. Исследование физико-механических свойств соломы / В.Д. Роговой // Респ. межведомств. тематич. научн. техн. сборник. – К., 1969. №13. – С. 45–48.

96. Рустамов, С.И. Физико-механические свойства растений и совершенствование режущих аппаратов уборочных машин / С.И. Рустамов. – Донецк: Вища школа. – 1981. – 172 с.

97. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим (550000) и технологическим (650000) направлениям. В 3 т. / И.В. Савельев – Спб.: Лань, 2007. – Т. 1-3.

98. Саргсян, А.Е. Строительная механика. Механика инженерных конструкций: учебник для вузов / А.Е. Саргсян. – М.: Высш. шк., 2004. – 462 с.

99. Соловьев, В.М. Исследование процесса прессования соломы при комбайновой уборке навесным прессом с качающимся поршнем: автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук / Соловьев Виталий Митрофанович. – М., 1954. – 24 с.

100. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев. – Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 140 с.

101. Способы подготовки стержней початков кукурузы / (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://zoovet.info/vet-knigi/111-kormlenie-zhivotnykh/khranenie-kormov/9201-sposoby-podgotovki-sterzhnej-rochatkov-kukuruzy>.

102. Схема испытания на ударную вязкость // (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru>

103. Сыроватка, В.И. Механизация приготовления кормов / [В.И. Сыроватка, А.В. Демин, А.Х. Джалилов и др.] – М: Агропромиздат, 1985. – 368 с.

104. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для вузов / С.М. Тарг. – М.: Высш. шк., 2008. – 415 с.

105. Теоретическая механика. Терминология. Буквенные обозначения величин: Сборник рекомендуемых терминов. Вып. 102. / М.: Наука, 1984. – 45 с.

106. Теория резания лезвием (виды резания, влияющие факторы, углы, направление сил) // (Электронный ресурс) – Режим доступа: <http://mydocx.ru/11-53313.html>.

107. Фирганг, Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим и технологическим направлениям и специальностям / Е.В. Фирганг. – Спб.: Лань, 2008. – 352 с.

108. Фриш, С. Э. Курс общей физики: учебник. В 3 т. / С.Э. Фриш. – Спб.: Лань, 2007. – Т. 1-3.

109. Шаповалов, В. И. Исследование работоспособности измельчителя стебельчатых продуктов с шарнирным креплением ножей [Текст] / В. И. Шаповалов, В.И. Павлюкович // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації (науковий журнал). – Луганськ: Видавництво СНУ ім. В. Даля, 2011. – №1(23). – С. 96–99.

110. Шацкий, В.В. Моделирование механизированных процессов приготовления кормов / В.В. Шацкий– Запорожье: ПЦ «Х-ПРЕС», 1998. – 140 с.
111. Шипачев, В.С. Основы высшей математики: учебное пособие для вузов / В.С. Шипачев. – Москва: Юрайт, 2009. – 478 с.
112. Щеглов, В.В. Корма: Приготовление, хранение, использование. Справочник / В.В. Щеглов, Л.Г. Боярский – М.: Агропромиздат, 1990. – 255 с.
113. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Учебное пособие для вузов / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Интеграл-Пресс, 2009. – 603с.
114. Яблонский, А.А. Сборник заданий для курсовых работ по теоретической механике: Учеб. пособие для студ. втузов / А.А. Яблонский, С.С. Норейко, С.А. Вольфсон и др. – М.: Интеграл-Пресс, 2008. – 382 с.
115. Бендера, І.М. Проектування механізованих технологічних процесів у тваринництві / [І.М. Бендера, В.П. Лаврук, С.В. Єрмаков та ін.] – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2011. – 564 с.
116. Брагінець, М.В. Дослідження фізико-механічних властивостей кормів / М.В. Брагінець // Вісник сільськогосподарської науки. – 1984. – №1. – с. 31 – 34.
117. Вольвак, С.Ф. Обґрунтування технологічного процесу і параметрів робочих органів гнучкого універсального малогабаритного кормоприготувального агрегату у варіанті подрібнення грубих кормів: дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / Вольвак Сергій Федорович– Луганськ: ЛСГІ, 1998. – 244 с.
118. Нагірний, Ю.П. Аналіз технологічних систем і обґрунтування рішень / Навчальний посібник [Ю.П. Нагірний, І.М. Бендера, Д.М. Бахарев та ін]. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2013. – 240 с.

119. Патент 69756 Україна, МКИ В02С18/00, А01F29/00. Подрібнювач грубих та стеблових кормів: Пат. 69756 Україна, МКИ В02С18/00, А01F29/00; М.В. Брагінець, Д.М. Бахарєв, О.А. Вертій. – Заявл. 07.11.2011; Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 5 с.

120. Ревенко, І.І. Визначення відстані між ярусами ножів подрібнювача-змішувача кормів / І.І. Ревенко, В.С. Хмільовський // Вісник Сумського державного аграрного університету. – Суми: – СДАУ. – 2000. – Вип. 5. – С. 79-82.

121. Ревенко, І.І. Машини та обладнання для тваринництва / І.І. Ревенко, М.В. Брагінець, В.І. Ревенко – К.: Кондор, 2009. – 731 с.

122. Ревенко, І.І. Механізація виробництва продукції тваринництва / І.І. Ревенко, Г.М. Кукта, В.М. Манько – К.: Врожай, 1994. – 264 с.

123. Ревенко, І.І. Удосконалення та обґрунтування параметрів подрібнювача-змішувача кормів / І.І. Ревенко, В.С. Хмільовський // Механізація сільськогосподарського виробництва. – Київ: – НАУ. – 1999. – Том 4. – С. 139-142.

124. Столярчук, А.Н. Заготівля кормів і нормова годівля сільськогосподарських тварин. / А.Н. Столярчук, Л.Г. Боярський. – Львів: Каменяр, 1998. – 173 с.

125. Хайліс, Г.А. Основи теорії та розрахунку сільськогосподарських машин / Г.А. Хайліс – К.: Видавництво УГСА, 1992. – 240 с.

126. Царенко, О.М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко та ін. – К.: Мета, 2003. – 448 с.

127. Шевченко, В.С. Деталі машин. Розрахунки конструювання, задачі / В.С. Шевченко. – Луганськ: Видавництво СНУ, 2000. – 490 с.

128. Шмат, К.І. Теорія і розрахунки зернозбиральних комбайнів. Навчальний посібник / [К.І. Шмат, О.Є. Самарін, Є.І. Бондореv, та ін.] - Херсон: ОЛДІ-плюс, 2003. – 256 с.

129. Ялпачик, Г.С. Стандарти та показники якості та енергомісткості процесу подрібнення кормів потрібно поліпшити / Г.С. Ялпачик, Ф.Е. Ялпачик // Механизация и электрификация с.х. – 1987. – № 1. – с. 24 – 25.

130. Alatoon, Mohammad. The mobile feed preparation shop with a continuous-running fodder mixer / Mohammad Alatoon. Materialy IX Miedzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania swiatowej nauki - 2013» - Volume 27. – Przemysl, 2013. – p. 14-15.

131. Currie, R.J. Reinforced autoclaved aerated concrete planks designed before 1980. – Garston; Watford, 1996. – 8 p.: Information paper / Building research establishment (Garston/Watford);10/96).

132. Mandelbrot, B.B. The fractal geometry of nature. – New York (USA): Freeman, 1983. – 480 p.8

133. McRandal, D., Mechanical and physical properties of grasses / D. McRandal, P. McNulty // Trans. am. soc. agric. eng. – 1980. – №4. – p. 816-821.

134. Shatsky, V.V. Loading of straw portion into feeders// XII C.I.G.R. World Congress and AgEng'94 Conference on Agricultural Engineering. – Milano (Italy). – 1994. – P.656-657.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



УПРАВЛЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО РАЗВИТИЯ
 АДМИНИСТРАЦИИ ГОРОДА АНТРАЦИТА
 И АНТРАЦИТОВСКОГО РАЙОНА
 ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ул. Ленина, 44, г. Антрацит, Луганской Народной Республики, 94613,
 тел. 2-71-06, E – mail: usgos@yandex.ru

07.12.2018 № 195

На № _____ от _____

Воронежский Государственный
 аграрный университет
 им. императора Петра I
 диссертационный совет
 Д 220.010.04

Решение задачи продовольственной безопасности возможно только при наличии хорошо развитой отрасли животноводства, что требует постоянного совершенствования технических средств и повышения их уровня эффективности.

Важнейшим направлением животноводства является скотоводство, в частности выращивание крупного и мелкого рогатого скота. Эффективное скотоводство невозможно без применения современных средств механизации производства, в том числе и кормопроизводства.

Основными компонентами кормовых смесей для крупного рогатого скота являются грубые стебельчатые корма, перевариваемость которых в значительной мере зависит от качества подготовки к скармливанию. В процессе подготовки к скармливанию важное место занимает измельчение, поскольку именно измельчение является наиболее энергоемкой операцией.

Особый интерес для фермерских хозяйств, специализирующихся на выращивании крупного рогатого скота, представляет собой измельчитель грубых стебельчатых кормов разработанный под руководством инженера Вертий А.А., заместителя директора по учебной работе «Краснолучского горно-промышленного колледжа». Под его руководством и при непосредственном участии внедрена и испытана установка для измельчения грубых стебельчатых кормов. На основании результатов научных исследований автора разработанный измельчитель рекомендован для эксплуатации в хозяйствах Антрацитовского района Луганской Народной Республики.

Внедрение измельчителя в технологический процесс приготовления кормов позволяет улучшить перевариваемость грубых стебельчатых кормов животными, что позволяет сберечь энергию при перевариваемости и положительно влияет на здоровье животных.

Управление сельского хозяйства Антрацитовского района считает, что внедрение измельчителя, разработанного инженером Вертий А.А., целесообразно в фермерских хозяйствах района, что позволит снизить затраты энергии при технологическом процессе приготовления кормов.

Зам. начальника управления АПР



Т.П.Ганина

**ЧАСТНОЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ АГРОФИРМА
«КОЛОС»**

Луганская Народная Республика, Антрацитовский район
п. Степное, ул. Дзержинского, 21, св-во о госрегистрации № 02-0000023/2015 от 23.04.2015г
Текущий счет № 40702810601620203001, МФО 611027201 Банк Госбанк ЛНР, код
ЕГРЮЛ 60200231, тел 0506160274; 0509190621; эл почта kolos.kolos.2000@mail.ua

В диссертационный совет Д220.010.04
Воронежского государственного
аграрного университета
им. императора Петра I

А К Т

о внедрении измельчителя грубых стебельчатых кормов

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о нижеследующем.

Научно-техническая документация измельчителя грубых стебельчатых кормов, разработанная под руководством инженера Вертий А.А. обладает актуальностью в современных условиях, представляет практический интерес и может использоваться при конструировании измельчителей грубых стебельчатых кормов.

В период с сентября 2017 г. по март 2018 г. в ЧСП АФ «Колос» в условиях производства проводились испытания промышленного образца измельчителя грубых стебельчатых кормов, по итогам которых указанный измельчитель решено рекомендовать к установке.

Директор ЧСП АФ «Колос»

Управляющий ЧСП АФ «Колос»

Инженер по ТБ

Проректор по научной работе
ВГАУ, д.т.н., доцент

Инженер



Хмиль М.И.

Хмиль В.М.

Фистик А.Н.

Гулевский В.А.

Вертий А.А.

В диссертационный совет Д 220.010.04
в Воронежском государственном
аграрном университете
им. императора Петра I

Об использовании результатов
научных исследований
инженера Вертий А.А.

На кафедре «Механизации производственных процессов в животноводстве» Луганского национального аграрного университета студентами агроинженерного факультета при курсовом и дипломном проектировании используются материалы опубликованных работ инженера Вертий А.А., посвященные моделированию процессов измельчения грубых стебельчатых кормов. Предложенная автором схема реализации данной модели основана на технологическом процессе измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами.

Зав. кафедрой механизации
производственных процессов
в животноводстве
к.т.н., доцент



Фесенко А.В.

Подпись	<i>Фесенко А.В.</i>
Подтверждаю:	<i>Фесенко А.В.</i>
Нач. отдела кадров	
« » »	



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент Украины на полезную модель



(11) 69756

(19) UA

(51) МПК (2012.01)
B02C 18/00
A01F 29/00

(21) Номер заявки: u 2011 13038

(22) Дата подання заявки: 07.11.2011

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: 10.05.2012(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: 10.05.2012,
Бюл. № 9(72) Винахідники:
Брагінець Микола
Володимирович, UA,
Бахарєв Дмитро
Миколайович, UA,
Вертій Олександр
Анатолійович, UA(73) Власник:
ЛУГАНСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
м. Луганськ-8, 91008. UA

(54) Назва корисної моделі:

ПОДРІБНЮВАЧ ГРУБИХ ТА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

(57) Формула корисної моделі:

1. Подрібнювач грубих та стеблових кормів, що містить раму з колесами, систему завантаження, яка складається із підбирача, живлячого та похилого транспортерів, блок протирізів, вивантажувальний канал та привідну станцію, який відрізняється тим, що для подрібнення кормів відповідно до зоотехнічних вимог з високою продуктивністю, мінімальною енергоємністю та матеріаломісткістю, в камері подрібнення встановлено комбінований робочий орган, на якому шарнірно закріплено парні молотки, між якими встановлено криволінійні горизонтальні та вертикальні ножі.

2. Подрібнювач за п. 1, який відрізняється тим, що робоча поверхня шарнірно закріплених молотків має криволінійну форму.

3. Подрібнювач за пп. 1 та 2, який відрізняється тим, що криволінійна форма горизонтальних і вертикальних ножів, та спосіб їх закріплення на молотках в будь-якій послідовності, забезпечує процес різання з ковзанням.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **69756** (13) **U**

(51) МПК (2012.01)

B02C 18/00**A01F 29/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

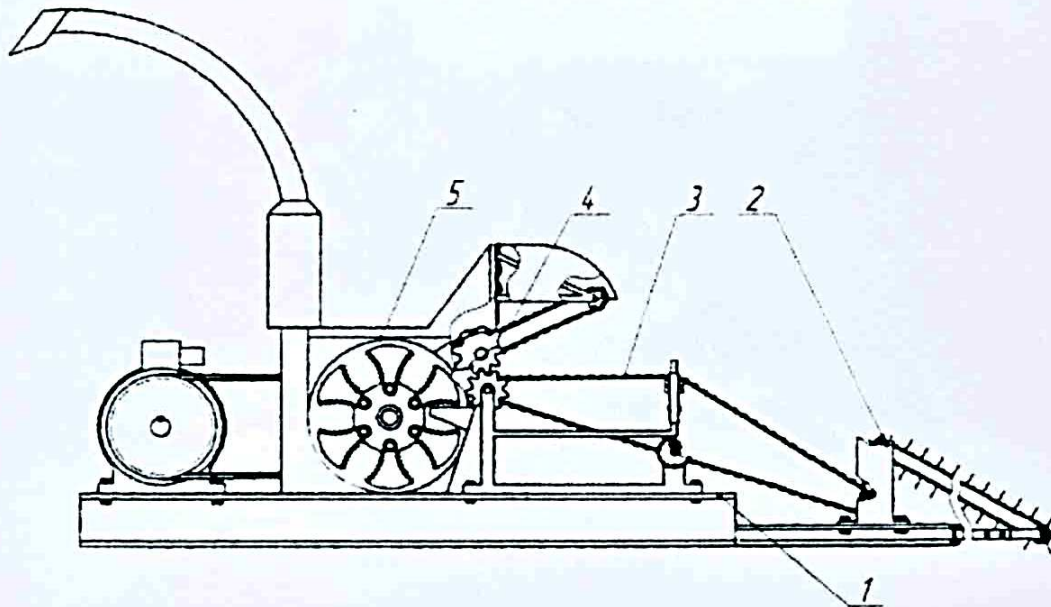
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2011 13038	(72) Винахідник(и): Брагінець Микола Володимирович (UA), Бахарєв Дмитро Миколайович (UA), Вертій Олександр Анатолійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 07.11.2011	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.05.2012	(73) Власник(и): ЛУГАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, м. Луганськ-8, 91008 (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.05.2012, Бюл.№ 9	

(54) ПОДРІБНЮВАЧ ГРУБИХ ТА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

(57) Реферат:

Подрібнювач грубих та стеблових кормів містить раму з колесами, систему завантаження, яка складається із підбирача, живлячого та похилого транспортерів, блок протирізів, вивантажувальний канал та привідну станцію. В камері подрібнення встановлено комбінований робочий орган, на якому шарнірно закріплено парні молотки, між якими встановлено криволінійні горизонтальні та вертикальні ножі.



Фиг. 1

UA 69756 U

Корисна модель належить до галузі сільськогосподарського машинобудування, зокрема, до конструкцій подрібнювачів грубих та стеблових кормів.

Відомі подрібнювачі грубих та стеблових кормів - аналоги, наприклад: ИРТ-10, ДКМ-5, ИГК-4 (Мельников С.В. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов / Мельников С.В. - Л.: Агропромиздат, 1985. - 420 с.), конструкція яких включає закріпленій на рамі молотковий або штифтовий ротор, завантажувальну горловину та вивантажувальний пристрій. Приведені вище машини подрібнюють грубі та стеблові корми відповідно до зоотехнічних вимог.

Недоліком ИРТ-10, ДКМ-5, ИГК-4 є висока матеріаломісткість, великі витрати електричної енергії та незручність у технічному та технологічному обслуговуванні.

Найбільш близьким прототипом до корисної моделі, яка нами запропонована, є дробарка кормів (А.С 13765 Российская федерация МПК В 02 С 18/00 А 01 F 29/00 дробилка кормов / Дремин Л.А., Мерзляков Б.И., Анисимов П.П., Баженов В.Н.; заявл. 03.08.1999; опубл. 27.05.2000, - 3 с.), яка передбачає можливість подрібнення грубих на стеблових кормів за допомогою ротора-крилача, на який в перетинах перпендикулярних горизонтальній вісі встановлено сегментні ножи. Прототип включає завантажувальний бункер, камеру подрібнення, в якій розташовано ротор з шарнірно закріпленними молотками, решето, вентилятор, нагнітаючий патрубок та привод, а також ротор виконаний у вигляді крилача, на якому закріплено декілька рядів сегментних ножів.

Конструкція прототипу має недосконалу систему робочих органів для подрібнення кормів, а саме, три незалежних робочих органа, які встановлено на один вал: молотковий барабан, ротор-крилач та вентилятор, які фактично з метою зменшення матеріаломісткості машини та зниження енерговитрат на подрібнення можуть бути об'єднані в один комбінований робочий орган. Таким чином, рівень техніки для подрібнення грубих та стеблових кормів не відповідає вимогам, які пред'являються до сучасних машин.

В основу корисної моделі поставлена задача розробки подрібнювача грубих та стеблових кормів, здатного виконувати процес подрібнення відповідно до зоотехнічних вимог з високою продуктивністю, мінімальною енергоємністю та матеріаломісткістю. Крім того, матеріаломісткість конструкції подрібнювача також повинна бути мінімально можливою. Це досягається шляхом використання ефективної системи завантаження та комбінованого робочого органа, який поєднує в собі молотковий барабан та ножовий ротор. Причому шарнірно закріплені молотки укомплектовані горизонтальними та вертикальними ножами, що дозволяє одночасно подрібнювати стеблові та грубі корми повздовж та поперек волокон. Крім того, криволінійна форма та спосіб закріплення горизонтальних та вертикальних ножів забезпечує процес різання з ковзанням.

Поставлена задача досягається тим, що подрібнювач грубих та стеблових кормів, який включає раму з колесами, систему завантаження, що складається із підбирача, живлячого та похилого транспортерів, камеру подрібнення, блок протиризів, вивантажувальний канал та приводну станцію, укомплектовано комбінованим робочим органом, на якому шарнірно закріплено парні молотки між якими встановлено криволінійні горизонтальні та вертикальні ножи.

При цьому з п.2 виходить, що робоча поверхня шарнірно закріплених молотків має криволінійну форму.

Крім того, із п.3 виходить, що криволінійна форма горизонтальних і вертикальних ножів, та спосіб їх закріплення на молотках в будь-якій послідовності, забезпечує процес різання з ковзанням.

На фіг.1 - зображено подрібнювач грубих та стеблових кормів, вигляд збоку;

на фіг.2 – зображено подрібнювач грубих та стеблових кормів, вигляд зверху;

на фіг.3 – приведено парний молоток з горизонтальними та вертикальними ножами.

Подрібнювач грубих та стеблових кормів включає раму 1, на рамі встановлено підбирач 2, живлячий 3 та похилий 4 транспортери, камера подрібнення 5, в якій встановлено блок протиризів 6 та комбінований робочий орган 7. Крім того, на рамі встановлено вивантажувальний канал 8 та приводну станцію 9. Комбінований робочий орган включає шарнірно закріплені парні молотки 10, на яких встановлено горизонтальні 11 та вертикальні 12 ножи, форма та спосіб закріплення яких забезпечує процес різання з ковзанням.

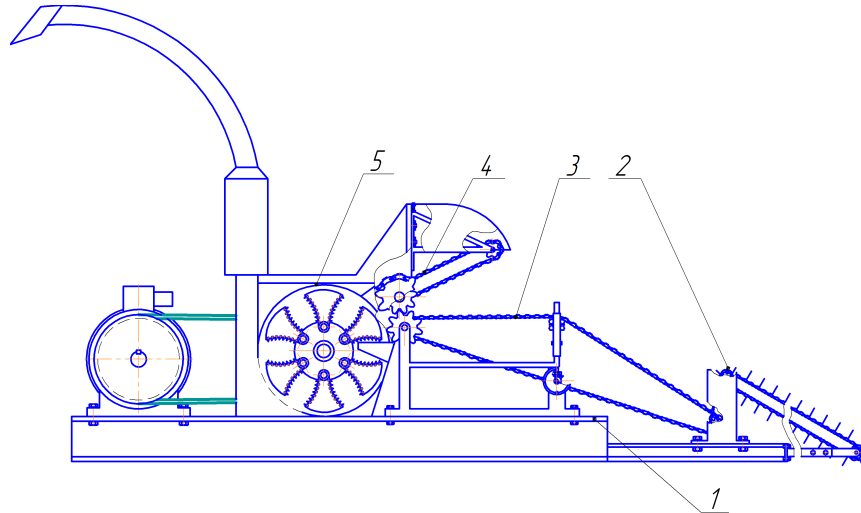
Працює подрібнювач грубих та стеблових кормів таким чином. Підбирач 2 захоплює тюковані або розсипні корми і подає їх до живлячого транспортеру 3, який переміщує корми до завантажувальної горловини. Одночасно з переміщенням корми стискаються за допомогою похилого транспортеру 4. В стисненому стані грубі або стеблові корми крізь завантажувальну горловину потрапляють в камеру подрібнення 5, де встановлено блок протиризів 6 та комбінований робочий орган 7. В свою чергу, комбінований робочий орган діє на грубі або стеблові корми парними молотками 10, вертикальні ножи 12 яких розрізають рослинний матеріал повздовж волокон, а горизонтальні ножи 11 відділяють частинки необхідної довжини від основної маси. Різання матеріалу виконується при взаємодії з протиризами. Подрібнені корми виводяться потоком повітря, що створює комбінований робочий орган по вивантажувальному каналу 8. Привод робочих органів виконується від приводної станції 9.

Формула корисної моделі

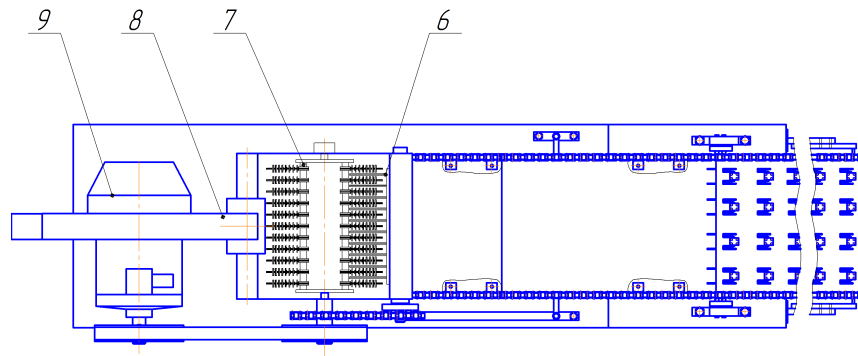
1. Подрібнювач грубих та стеблових кормів, що включає раму з колесами, систему завантаження, яка складається із підбирача, живлячого та похилого транспортерів, блок протиризів, вивантажувальний канал та приводну станцію, який відрізняється тим, що з метою подрібнення кормів відповідно до зоотехнічних вимог з високою продуктивністю, мінімальною енергоємністю та матеріаломісткістю, в камері подрібнення встановлено комбінований робочий орган, на якому шарнірно закріплено парні молотки, між якими встановлено криволінійні горизонтальні та вертикальні ножі.

2. Подрібнювач грубих та стеблових кормів по п.1, який відрізняється тим, що робоча поверхня шарнірно закріплених молотків має криволінійну форму.

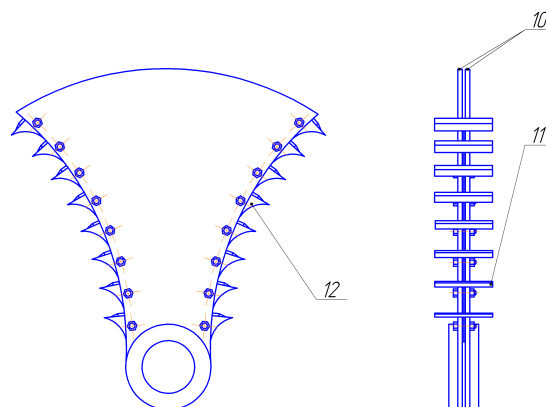
3. Подрібнювач грубих та стеблових кормів по пп. 1 та 2, який відрізняється тим, що криволінійна форма горизонтальних і вертикальних ножів, та спосіб їх закріплення на молотках в будь-якій послідовності, забезпечує процес різання з ковзанням.



Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты статистической обработки данных полученных при проведении многофакторного эксперимента

Таблица Б1 – Расчет коэффициентов регрессии

Effect	Parameter Estimates (Матрица) Sigma-restricted parameterization									
	Y1 Param.	Y1 Std.Err	Y1 t	Y1 p	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt	Y1 Beta (?)	Y1 St.Err.?	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt
Intercept	147,799219	15,68704	9,42174	0,000227	107,474	188,1240				
X1	-0,264146	0,02964	-8,91188	0,000296	-0,340	-0,1880	-62,5683	7,020771	-80,6158	-44,5208
X1^2	0,000127	0,00001	8,60453	0,000350	0,000	0,0002	59,3639	6,899139	41,6291	77,0987
X2	-109,750000	23,09540	-4,75203	0,005095	-169,119	-50,3814	-19,4974	4,102961	-30,0444	-8,9504
X2^2	125,000000	26,14901	4,78030	0,004969	57,782	192,2182	11,1126	2,324671	5,1369	17,0884
X3	-0,213042	0,12717	-1,67523	0,154741	-0,540	0,1139	-6,3079	3,765405	-15,9872	3,3714
X3^2	0,001400	0,00094	1,48720	0,197116	-0,001	0,0038	2,0774	1,396881	-1,5134	5,6682
X1*X2	0,045833	0,01884	2,43246	0,059201	-0,003	0,0943	8,5088	3,498008	-0,4831	17,5007
X1*X3	0,000112	0,00011	0,99510	0,365376	-0,000	0,0004	3,3656	3,382197	-5,3286	12,0598
X2*X3	0,116667	0,15074	0,77397	0,473938	-0,271	0,5042	1,0098	1,304674	-2,3440	4,3635

Таблица Б2 – Расчет критерия Фишера

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (Матрица)										
	Multiple R	Multiple R?	Adjusted R?	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Y1	0,977333	0,955180	0,874503	0,217908	9	0,024212	0,010225	5	0,002045	11,83963	0,007072

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Техническая характеристика электронных весов SW-02

№ п/п	Наименования показателей	Единицы измерений	Значения
1	Тип дисплея		ЖК
2	Количество разрядов индикации		5
3	Дискретность	г	0,1
4	Наименьший предел взвешивания	г	2
5	Наибольший предел взвешивания	кг	100
6	Габаритные размеры Д×Ш	мм	230 × 182
7	Класс точности		3(средний)
8	Время стабилизации показов	сек	3
9	Рабочая температура	°С	-10...+40
10	Цена поверочного деления	ед	1
12	Масса	кг	2,7

Техническая характеристика преобразователя сигнала ADAM-4016

№ п/п	Наименования показателей	Единицы измерений	Значения
1	Дифференциальный вход		
2	Гальваническая изоляция	В (пост.тока)	3000
3	Программа настройки входного диапазона		
4	Частота выборки	Гц	10
5	Источник питания тензомоста	В	0-10
6	4 дискретных выхода		

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Техническая характеристика датчика контроля массы

№ п/п	Наименования показателей	Единицы измерений	Значения
1	Номинальная нагрузка	кг	10-100
2	Номинальная чувствительность	М В/В	2±0,2
3	Суммарная погрешность	ML C ₃	01
4	Баланс нуля	%	3
5	Температурное отклонение нуля	%/10 С°	±0,0175
6	Входное сопротивление	Ом	350±3
7	Сопротивление изоляции	≥ мОм	2000
8	Диапазон термокомпенсации	С°	-10...+40
9	Диапазон рабочих температур	С°	-10...+50
10	Предельно допустимая нагрузка	% E _{max}	150
12	Рекомендуемое напряжение питания	В	10
13	Максимальное напряжение питания	В	15
14	Класс защиты		IP65
15	Материал корпуса		алюминий