

На правах рукописи



Пушкарев Александр Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
ЗЕРНА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
С РЕЖУЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина» (ФГБОУ ВО Омский ГАУ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Сабиев Уахит Калижанович

Официальные оппоненты:

Сергеев Николай Степанович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ»
заведующий кафедрой технологии
и механизации животноводства
и инженерной графики

Садов Виктор Викторович,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ»
заместитель декана инженерного
факультета по учебно-методической
работе

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «14» декабря 2018 года в 13 ч.00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.004.02 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс +7(3852) 36-71-29; официальный сайт: <http://www.altstu.ru>; электронный адрес: epb_401@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», автореферат и диссертация размещены на сайте <https://www.altstu.ru/structure/unit/odia/scienceevent/3766/>.

Автореферат разослан « _____ » 2018 г.

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



Куликова Лидия Васильевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Одна из главных задач агропромышленного комплекса – обеспечение населения продукцией животноводства. При реализации Государственной программы «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы» важно решение проблемы животноводческого комплекса страны, в том числе и проблем кормопроизводства.

Перед скармливанием зерновые культуры подвергаются различным видам обработки. Один из основных способов – измельчение. Его цель – разрушение твердой оболочки и увеличение площади поверхности зерна, контактирующей с пищеварительными ферментами. Это способствует более полному усвоению энергии корма животными.

На процесс измельчения приходится наибольшее количество затрат электроэнергии: более 50% от общих трудозатрат приготовления кормов.

Из вышесказанного очевидна значимость совершенствования измельчителей кормов. Вариантом решения является применение измельчителей зерна с режущими элементами криволинейной формы.

Научные исследования и разработки, выполненные при решении данной задачи, являются основой диссертационной работы, которая соответствует утвержденному плану НИР ФГБОУ ВО ОмГАУ по теме «Совершенствование технологических процессов зональных машин и оборудования для механизации растениеводства и животноводства» – номер государственной регистрации 01201156732.

Степень разработанности темы. Вопросам повышения эффективности использования измельчителей зерновых материалов посвящены работы А.И. Завражнова, А.И. Зотьева, В.А. Елисеева, В.В. Садова, В.В. Фомина, В.И. Денисова, В.И. Сыроватки, В.Р. Алешкина, Г.Ф. Бахарева, И.Б. Шагдырова, И.Я. Федоренко, Н.С. Сергеева, П.И. Леонтьева, С.В. Золотарева, С.Е. Андреева, У.К. Сабиева и других ученых.

Основными направлениями повышения эффективности работы измельчающих машин являются:

1. Разработка и усовершенствование новых конструкций измельчителей зерна.
2. Оптимизация конструктивных параметров технических средств.

Результаты изысканий, посвященных данным проблемам, послужили теоретической основой для исследования процессов разрушения зерновых материалов и выявления новых, ранее не учитываемых факторов.

Цели и задачи. Снижение удельной энергоёмкости процесса измельчения фуражного зерна и повышение однородности гранулометрического

состава готового продукта за счет совершенствования основных конструктивных параметров измельчителя фуражного зерна.

Объект исследования. Технологический процесс разрушения зерна с использованием рабочих органов с режущими элементами криволинейной формы в измельчителе центробежно-роторного действия.

Предмет исследования. Закономерности процесса разрушения зерна в измельчителе зерновых материалов способом среза и скалывания.

Научная гипотеза. За счет применения рабочих органов с режущими элементами криволинейной формы можно снизить энергоёмкость процесса измельчения и повысить качество (снизить количество переизмельчённой фракции) готового продукта.

Научная новизна и теоретическая значимость.

1. Установлены закономерности динамического и кинематического взаимодействия зернового материала с рабочими органами предлагаемого измельчителя.

2. За счет исполнения режущих кромок рабочих органов в форме циклоиды усовершенствован технологический процесс измельчения зерна. Это позволяет получить продукт помола с заданной степенью измельчения и требуемым качеством.

3. Предложены и обоснованы геометрические параметры режущих элементов рабочих органов измельчителя с учетом изменения стенок сквозных пазов рабочих органов, создающих оптимальный угол защемления, что соответствует теории резания В.П. Горячкина.

4. Научная и техническая новизна и достоверность результатов работы подтверждены патентом на полезную модель № 162055, результатами лабораторных и производственных испытаний, показавших снижение удельной энергоёмкости процесса измельчения при качестве готового продукта, соответствующем зоотехническим требованиям.

Практическая значимость. Предложена технологическая схема измельчителя зерна с режущими элементами криволинейной формы. Обоснованы конструктивно-режимные параметры измельчителя зерна. Результаты исследований могут применяться при разработке подобных технических средств, а также в учебном процессе образовательных учреждений.

Методология и методы исследования. Для теоретических исследований применялись методы теоретической и технической механики, методы решения дифференциальных уравнений.

Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальной проверкой в условиях лаборатории и производства. Достоверность работы засвидетельствована сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлена на ПЭВМ с использованием пакетов программ Wolfram Alpha, Excel, КОМПАС-3D.

Положения, выносимые на защиту:

- Параметры измельчающих элементов рабочих органов измельчителя зерна центробежно-роторного действия с режущими элементами криволинейной формы.

- Математическая модель движения сегмента зерновки в канале рабочего органа на второй и последующих ступенях предлагаемого центробежно-роторного измельчителя.

- Результаты экспериментальных исследований предлагаемого измельчителя зерна с режущими элементами криволинейной формы.

Степень достоверности исследования, выносимого на защиту:

- применение стандартных методов и методик исследования с соблюдением требований и рекомендаций соответствующих стандартов;

- применение ПК при математическом анализе и статистической обработке результатов исследований;

- применение измерительных приборов, прошедших поверку.

Реализация результатов работы. Проведена производственная проверка экспериментального образца измельчителя зерновых материалов с режущими элементами криволинейной формы.

Апробация результатов исследования.

На научных конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов ОмГАУ в период с 2015 по 2018 г.:

- на конференции конкурса У.М.Н.И.К. VI Региональная молодежная научно-техническая конференция «Омский регион – место рождения возможностей», 27 ноября 2015 г.;

- конференции «Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК», 2 февраля 2016 г.;

- Международной конференции «Современное состояние, перспективы развития молочного животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции», 7 – 8 апреля 2016 г.;

- конференции на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых ОмГАУ, 27 января 2017 г.;

- Региональной научно-практической конференции молодых ученых «Биотехнологии в сельском хозяйстве, промышленности и медицине», 3 апреля 2017 г.;

- Региональной научно-практической конференции молодых ученых «Биотехнологии в сельском хозяйстве, медицине», 25 апреля 2017 г.;

- конференции Всероссийского конкурса на лучшую работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений МСХ РФ по Сибирскому федеральному округу, 12 апреля 2017 г.;

- конференции «Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития», 6 апреля 2017 г.;

- Сибирской агротехнической выставке-ярмарке «Агро-Омск-2017», 17 – 23 июля 2017 г.;

- Международной научно-технической конференции «Эффективное животноводство – залог успешного развития АПК региона», посвященной году животноводства в Омской области;
- конференции, посвященной конкурсу инновационных идей среди обучающихся ОмГАУ, 28 ноября 2017 г.;
- 40-й Региональной студенческой научно-практической конференции «Молодежь третьего тысячелетия», 2 – 27 апреля 2017 г.;
- выставке «Научные достижения преподавателей и обучающихся Омского ГАУ», февраль 2017 г.;
- второй научно-технической конференции ФТС в АПК, 28 февраля 2017 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 в рецензируемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Содержание диссертационной работы изложено на 125 страницах, включая 66 рисунков, 18 таблиц и списка литературы из 198 наименований, в том числе 8 на иностранных языках.

Содержание работы

Во введении раскрыта актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, кратко изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние процесса измельчения зерновых материалов на корм сельскохозяйственным животным, задачи исследований» даны общие понятия о зерновом сырье, предназначенном для производства комбикормов, и требования к его измельчению. Рассмотрены основные физико-механические свойства зерновых культур и их влияние на процесс измельчения. Приведены основные требования к измельчению зерновых культур на корм сельскохозяйственным животным.

Проанализированы результаты научных исследований физико-механических свойств зерна, рассмотрены некоторые виды лезвийных инструментов и конструктивные особенности распространенных технических средств для измельчения зерна.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на технологические показатели рабочего процесса в центробежно-роторных аппаратах.

Проблемами теоретического описания процесса разрушения материалов занимались такие ученые, как: А.А. Гриффитс, А.К. Рундквист, В.И. Акунов, В.П. Горячкин, Е.А. Герсам, Е.М. Гутьяр, Л.Б. Левенсон, П.Р. Риттингер, П.А. Ребиндер, Р. Гийко, С.С. Харрис, С.Д. Хусид, С.В. Мельников, В.А. Елисеев, Ф. Кик, Ф.С. Бонд и др.

Влиянию конструктивных параметров на процесс измельчения посвящены исследования многих ученых: Г.Ф. Бахарева, В.А. Дронова, В.А. Зотова, В.В. Фомина, М.Г. Ефимова, П.И. Леонтьева, Н.С. Сергеева, С.В. Золотарёва, И.Я. Федоренко, И.Б. Шагдырова, У.К. Сабиева и др.

Анализ работ, посвященных измельчению различных материалов, в том числе и зерновых, показал, что у процессов резания – схожие закономерности и факторы.

Поэтому разработка новых технических средств, выбор рациональных способов измельчения и создание рациональных рабочих органов измельчителей имеет большое значение. Анализ исследований физико-механических свойств зерновых материалов и основных технических средств по их измельчению позволил установить следующее:

- Классические теории измельчения не позволяют в полной мере описать сложные процессы разрушения материала, но могут быть применены для сравнительной оценки и обоснования способов измельчения зерновых культур.

- Конструктивно-технологические параметры решетных молотковых дробилок – основных измельчающих машин в настоящее время – не позволяют достаточно качественно осуществлять измельчение зерна.

- В конструкции решетных молотковых дробилок качество получаемого продукта регулируется дорогостоящими сменными решетками. Для удаления готового продукта через решета требуется дополнительная затрата энергии.

- В поисках более эффективных способов измельчения и ускоренного отвода готового продукта из рабочей камеры были рассмотрены безрешётные центробежно-роторные аппараты как наиболее компактные, легко вписывающиеся в технологические линии.

- Измельчение способом среза и скалывания является выгодным видом, с точки зрения снижения удельной энергоемкости и повышения качества измельчения.

В соответствии с целью настоящей работы необходимо решить задачи:

1. Выявить основные закономерности процесса измельчения при использовании рабочих органов измельчителя с режущими элементами криволинейной формы.

2. Обосновать основные конструктивные параметры процесса измельчения, установить форму и размеры режущей кромки кольцевых выступов.

3. Дать оценку эффективности основных результатов исследований.

Во второй главе «Теоретическое исследование процесса разрушения сыпучих кормов в измельчителе зерна рабочими органами с режущими элементами криволинейной формы» рассмотрены основные способы механического разрушения материалов и теории их измельчения.

Механическое измельчение зерна можно разделить на два основных процесса: резание и дробление. Многие исследователи в своих работах пришли к выводу о том, что резание – наименее энергоемкий процесс при измельчении зерна.

Совершенствование рабочих органов измельчающих средств, снижение энерго- и материалоемкости кормоприготовительных машин, повышение качества получаемых продуктов невозможно без знания физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Способ измельчения, определяемый физико-механическими свойствами материала, его начальными и конечными размерами, оказывает существенное влияние на удельную энергоемкость и качество измельчения. Поэтому выбор рациональных способов измельчения и на их основании разработка рациональных рабочих органов измельчителей имеет большое значение, а разработка технологий и конструктивных параметров по повышению производительности, улучшению качества измельчения и надежности рабочих органов в зерноизмельчающих машинах – весьма актуальная задача.

Анализ факторов, влияющих на эффективность работы измельчителя фуражного зерна, позволил установить теоретические закономерности взаимодействия зернового материала с режущими элементами рабочих органов измельчителя:

- Обоснование геометрических параметров режущих элементов криволинейной формы.
- Теоретическое определение толщины сегмента зерна на выходе с первого кольца рабочих органов измельчителя с учетом изменения геометрии рабочих органов.
- Математическое описание направления разворота сегмента зерновки после выхода с первого кольца рабочих органов измельчителя.
- Получение расчетных данных, показывающих влияние геометрии режущего элемента на усилие резания.
- Нахождение системы дифференциальных уравнений, описывающих положение сегмента зерновки в канале рабочего органа. В качестве модели зерновки примем трехосный эллипсоид, а в качестве модели сегмента зерновки – сегмент трёхосного эллипсоида.

При работе режущего элемента криволинейной формы резание зерновки или ее частицы происходит на отдельном участке под определенным углом (Рисунок 1).

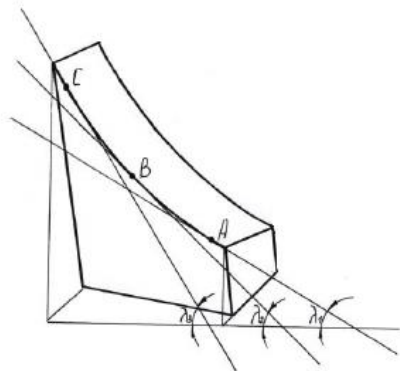


Рисунок 1 – Углы резания на отдельных участках режущего элемента

При проектировании режущего элемента приняты ограничения с учетом результатов планируемого полного факторного эксперимента и исследований прошлых лет. Наиболее выгодными были приняты углы резания в диапазоне от 15 до 32°. Графическим методом была построена 3D-модель измельчающего элемента криволинейной формы (Рисунок 2)

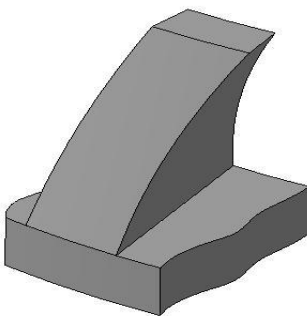


Рисунок 2 – 3D-модель измельчающего элемента криволинейной формы

Режущая кромка рабочего органа представляет некоторую кривую. При проектировании рабочего органа и разработки технологического процесса изготовления, а также при изготовлении установлено, что данная кривая является половиной циклоиды (Рисунок 3).

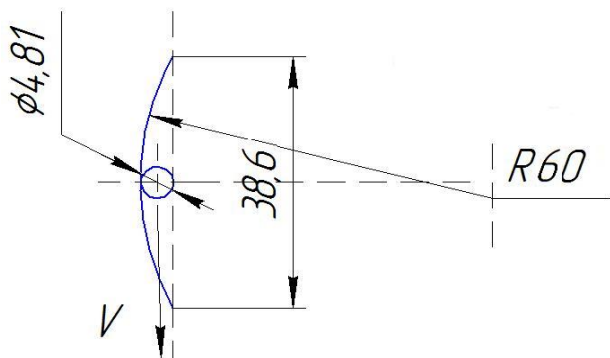


Рисунок 3 – Кривая резания, образующая кромку режущего элемента

Рассмотрение работы режущего элемента в плоской системе координат показывает, что режущая кромка представляет лишь половину циклоиды и является веткой параболы (Рисунок 4).

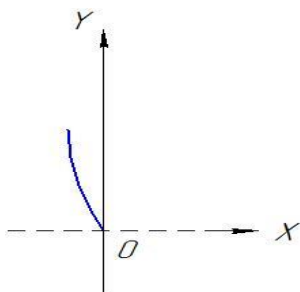


Рисунок 4 – Кромка лезвия измельчающего элемента в плоской системе координат

Для оценки эффективности использования криволинейного лезвия сравним его с лезвиями прямолинейной формы. Рассмотрим усилия резания на прямолинейной и криволинейной режущих кромках.

$$P = P_n + P_d + P_z + P_v, \quad (1)$$

где P_n – усилие резания оболочки зерновки; P_d – усилие деформирования зернового материала гранью режущей кромки; P_z – усилие преодоления сопротивления трения вспомогательной плоскости ножа о зерновку; P_v – усилие преодоления сопротивления трения грани наружной поверхности (Рисунок 5).

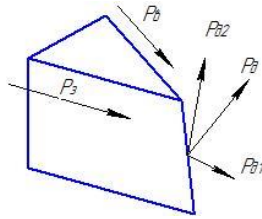


Рисунок 5 – Схема сил, составляющих усилие резания в работе плоским лезвием

Усилие надрезания зерновки плоскими ножами с криволинейной режущей кромкой определим по формуле

$$P_H = 2q_{\text{л}} \rho \sqrt{x(d_c - x)(2 + \mu_{\text{л}}(1 + \cos \delta))}, \quad (2)$$

где q – нормальное удельное давление на лезвие ножа, при котором происходит разрушение оболочек зерновки; x – глубина внедрения ножа, м; ρ – радиус закругления лезвия ножа; $\mu_{\text{л}}$ – коэффициент трения лезвия ножа о зерновку; δ – угол резания ножа, равный углу его заточки; d_c – диаметр зерновки в месте перерезания, м.

Усилие деформирования зерновки передней гранью для плоских ножей с прямолинейной режущей кромкой можно рассчитать по формуле

$$P_d = 2 \cdot \sigma_{\text{в.см.}} t_n (1 + \mu_d \operatorname{ctg} \delta t \sqrt{x(d_c - x)}), \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{в.см.}}$ – временное сопротивление зерна пшеницы смятию передней грани ножа, кН/м²; t_n – ширина режущей кромки ножа, м; μ_d – коэффициент трения лезвия режущего элемента о зерновку.

Определим усилие преодоления сопротивления по задней и передней поверхностям режущего элемента

$$P_z = K_{\text{в.в.}} \rho F_3 \mu_3, \quad (4)$$

где $K_{\text{в.в.}}$ – коэффициент восстановления зернового материала; F_3 – площадь контакта задней грани режущего элемента и зернового материала; μ_3 – коэффициент трения зерна о заднюю поверхность

$$P = P_{\kappa} \sin \lambda + P_z + P_e,$$

где λ – угол наклона режущей кромки к вектору скорости резания.

При резании ножом с углом λ к вектору скорости возникают две сопутствующие резанию силы: $P_{\kappa} \cdot \cos \lambda$ – отжимная сила, действующая пер-

пендикулярно вектору резания, $P_k \sin \lambda$ – усилие внедрения режущего элемента (Рисунок 6).

Для дальнейшего сравнительного анализа авторы воспользовались графоаналитическим методом.

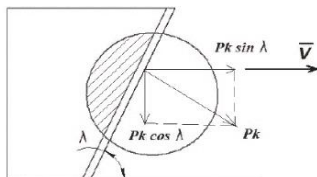


Рисунок 6 – Зависимость усилия резания зернового материала от угла наклона режущего элемента

При помощи ЭВМ были построены схемы движения прямо- и криволинейного движения лезвий в теле зерновки (Рисунок 7)

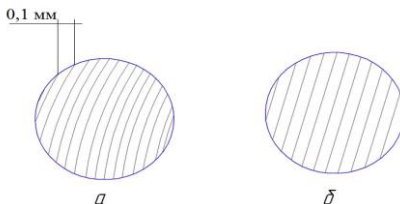


Рисунок 7 – Схема определения длины режущей кромки: а – для криволинейной режущей кромки; б – для прямолинейной режущей кромки

Среднее значение угла резания определялось как среднее арифметическое значение в точках на лезвии, длина которого в данный момент участвует в резании (Рисунок 8). Зависимости углов резания от перемещения приведены на рисунках 9 и 10.

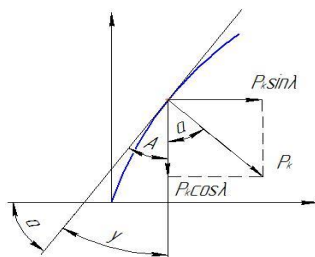


Рисунок 8 – Определение угла λ для криволинейного режущего элемента

$$\lambda = 90 - \alpha, \quad (5)$$

где α – угол касательной прямой к функции в любой точке на кривой.

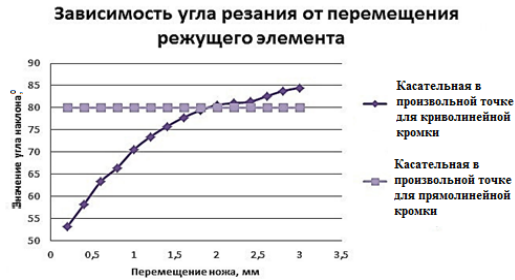


Рисунок 9 – Зависимость среднего значения λ от перемещения ножа

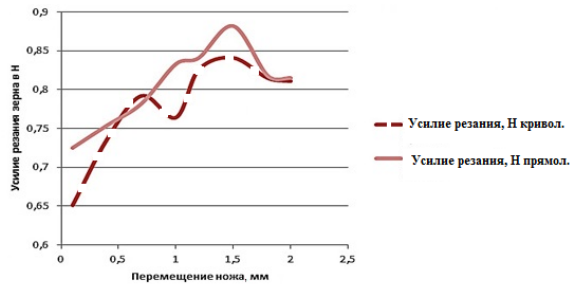


Рисунок 10 – Изменение усилия резания от перемещения режущего элемента с прямо- и криволинейными режущими элементами

Расчет усилия резания для зернового материала достаточно затруднен из-за неоднородности зерновок, в связи с этим приходится прибегнуть к грубым допущениям. В теории резания не разработано единой теории для определения усилия резания зернового материала, необходимы экспериментальные исследования. Полученные расчетные данные показывают снижение резания для криволинейного ножа на 6,3% и увеличение хода резания ножа на 0,07 мм.

В работах Н.С. Сергеева и В.В. Фомина установлено, что зерно, двигаясь в канале первой ступени центробежно-роторного измельчителя, ориентируется длинной осью вдоль стенки канала. Следовательно, при вращении ротора, двигаясь под действием центробежной силы, зерновка нарезается на сегменты высотой h (Рисунок 11).

Применив математическое описание движения зерновки авторы установили: оптимальная скорость резания равна $\omega = 230 \text{ рад/с}$, с учетом того,

что у первого кольца рабочих органов измельчителя две режущие пары. Сегмент зерновки имеет высоту около $h \sim 1,5$ мм (Рисунок 11). Это свидетельствует о том, что конструктивное изменение рабочих органов не влияет на движение зерновки.

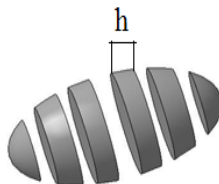


Рисунок 11 – Теоретическое разделение зерновки после первой ступени измельчения

Предположим, что разрезание зерновки в измельчителе происходит как и на рабочих органах, предложенных Н.С. Сергеевым, то есть по поверхности предварительного среза рабочими органами предыдущей ступени.

Рассмотрим движение сегмента зерновки при ориентации в канале рабочего органа (Рисунок 12).

На сегмент зерновки действуют силы:

- сила тяжести $P = mg$ (направлена вниз);
 - нормальная реакция силы тяжести N_p (направлена вверх);
 - центробежная сила $F_{Ц} = m\omega^2 R$ (направлена вдоль радиуса от оси вращения), где $\omega = \pi n/30$;
 - сила Кориолиса $F_K = 2m\omega V_0$ (направлена перпендикулярно стенке режущего элемента против направления вращения);
 - нормальная реакция стенки режущего элемента (направлена перпендикулярно стенке режущего элемента по направлению вращения);
 - сила трения $F_{T1} = fmg$ – действующая на поверхности диска;
 - сила трения $F_{T2} = 2fm\omega V_0$ – действующая по поверхности лопатки,
- где V_0 – скорость движения сегмента зерновки по диску, m – масса сегмента зерновки, f – коэффициент трения поверхности сегмента зерновки по поверхности диска-ротора, ω – угловая скорость вращения ротора, g – ускорение силы тяжести, n – частота вращения ротора.

На рисунке 12 показано, как отрезанный на первой ступени измельчения сегмент зерновки находится в неустойчивом положении, в силу того что опирается на рабочий орган эллипсоидной частью, следовательно, имеет только одну точку опоры.

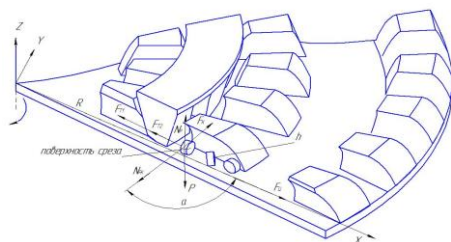


Рисунок 12 – Схема движения сегмента зерновки после выхода с первого кольца рабочих органов измельчителя по ротору, вдоль стенки режущего элемента: R – расстояние от оси вращения до центра масс сегмента

Для теоретического определения направления разворота сегмента зерновки установим момент силы F_K из уравнения:

$$J_z \ddot{\alpha} = F_K b \cos \alpha + F_u b \sin \alpha - F_{T2} b \sin \alpha, \quad (6)$$

где

$$J_z = mb^2 + \frac{m}{5} \left(b^2 + \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right) = \left(\frac{24b^2 + 5h^2}{20} \right)$$

и момент силы P из уравнения:

$$J_y \ddot{\beta} = Pb \cos \beta - F_{T1} b \sin \beta + F_u b \sin \beta, \quad (7)$$

где

$$J_y = ma^2 + \frac{m}{5} \left(a^2 + \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right) = \left(\frac{24b^2 + 5h^2}{20} \right)$$

Решив данные уравнения, получаем: момент силы F_K при скорости резания $\omega = 5$ рад/с превосходит момент силы P, отсюда следует, что при реальных условиях измельчения на оптимальной скорости резания ($\omega = 230$ рад/с) сегмент зерновки, полученный после первой ступени, ориентируется поверхностью среза к поверхности режущего элемента, дальнейшее его измельчение на второй и последующих ступенях произойдет преимущественно по поверхности предварительного среза рабочими органами предыдущей ступени.

Проанализируем движение сегмента зерновки при развороте поверхностью среза к поверхности режущего элемента.

Основной закон динамики для относительного движения сегмента зерновки имеет вид:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{T1} + \vec{F}_{T2} + \vec{P} + \vec{F}_u + \vec{F}_K, \quad (8)$$

где $\ddot{a}$ – ускорение относительного движения сегмента зерновки ($a = \ddot{x}$);
 $\sum \vec{F}$ – геометрическая сумма действующих на сегмент зерновки сил.

Для определения поступательного движения сегмента зерновки спроецируем это уравнение на оси X, Y, Z, получим систему уравнений.

$$\begin{cases} \ddot{x} = -2\omega\dot{x} + \omega^2 x - gf, \\ \ddot{\alpha} = \frac{2\omega\dot{x} \cos \alpha + \omega^2 x \sin \alpha - gf \sin \alpha}{\frac{24b^2 + 5h^2}{20}}, \end{cases} \quad (9)$$

где α – угол между плоскостью среза сегмента и плоскостью режущего элемента; x – перемещение сегмента с момента среза.

Данная система уравнений позволяет исследовать поступательное и вращательное движение сегмента зерновки при движении по ротору, вдоль стенок режущего элемента.

Первое уравнение системы (9) с начальными условиями:

$$\begin{cases} x(0) = x_0, \\ \dot{x}(0) = 0 \end{cases}$$

есть задача Коши для линейного неоднородного дифференциального уравнения 2-го порядка с постоянными коэффициентами.

Второе уравнение системы (9) допускает решение в виде общего интеграла (в неявном виде).

Численное решение системы реализовано в программе MS Excel, графическая интерпретация для пшеницы и гороха представлена на рисунке 13.

Зависимости показывают, что сегмент зерновки в канале рабочего органа второй ступени успевает повернуться плоскостью среза вдоль режущего элемента за относительно небольшое перемещение (около 0,05 мм) (Рисунок 13, а) с приобретённой скоростью частицы (менее 0,06 м/м) (Рисунок 13, б). Это позволяет утверждать, что резание сегмента зерновки на следующей ступени измельчения будет происходить по плоскости среза предыдущей, это удовлетворяет условию резания материала по наименьшему сечению.

Таким образом, для рассматриваемой модели движения зерна в канале рабочего органа измельчителя, была составлена система дифференциальных уравнений, позволившая определить необходимую длину канала для разворота сегмента зерновки плоскостью среза к плоскости резания.

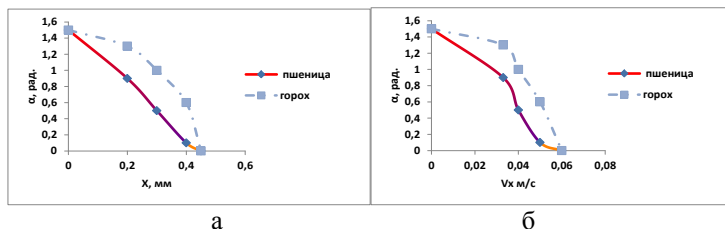


Рисунок 13 – Кинематика сегмента зерновки при движении по ротору, вдоль стенки режущего элемента:

а – зависимость угла поворота сегмента зерновки α от перемещения x ;

б – зависимость угла поворота сегмента зерновки α от времени скорости t

Как видно, зерновка успевает повернуться длинной осью к зоне измельчения за малый промежуток времени.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований рабочих органов с режущими элементами криволинейной формы измельчителя зерна» проведен выбор наиболее распространенных в регионе кормовых культур для проведения экспериментов. Рассмотрены и предложены методики исследования физико-механических свойств зерна, определения формы сегментов зерновки на выходе первой ступени измельчителя и методика, установившая положение сегмента зерновки в каналах рабочих органов. Предложена методика определения формы режущего элемента рабочего органа измельчителя.



Рисунок 14 – Приспособление для определения оптимальной формы режущей кромки: 1– ручной пресс с регулируемым усилием; 2 – регулировочные винты; 3 – сменное лезвие; 4 – хвостовик; 5 – корпус устройства

Анализ оптимальной формы режущей кромки рабочего органа выполнялся на приспособлении, имитирующем работу режущих органов измельчителя при различной влажности материала (Рисунок 14). Зерновка укладывается на противорежущую пластину при поднятом на 90° сменном ноже. Нож постепенно опускается, зерновка выталкивается из раствора, обра-

зованного сменным лезвием и противорежущей пластиной до того момента, когда усилие скольжения резания превысит усилие скольжения зерновки о противорежущую пластину, при этом зерновка прекратит свое движение и начнется перерезание. В.П. Горячкин установил, это происходит при достижении угла защемления χ , и показал, что выталкивание предмета и его неподвижное положение в момент достижения критического значения угла χ зависят от углов трения между кромками лезвий и предметом.



Рисунок 15 –
Экспериментальная установка



Рисунок 16 –
Предлагаемые рабочие органы

Определяли форму сегментов зерновки на выходе первой ступени измельчителя на опытной экспериментальной установке (Рисунок 15).

Установка состоит из следующих частей: корпуса 1, нижнего диска-ротора 2, колец первой и второй ступеней измельчения 3, 4, крышки 5.

Процесс измельчения осуществляется рабочими органами установки, которая защищена патентом на полезную модель РФ № 162055.

Для обоснования конструктивных и технологических параметров рабочих органов измельчителя был выбран план полного факторного эксперимента. По результатам опытов построены уравнения регрессии, проверяли значимость и незначимость которых по критерию Фишера.

Методика проведения исследований заключается в следующем:

- с рабочего органа снимается противорежущее кольцо второй ступени;
- при установившемся режиме открывается задвижка бункера для поступления зерна в камеру измельчения;
- при наступлении стабильного рабочего режима установки выход зерна из бункера перекрывается отсекателем, отделяя порцию зерновой дерти;
- для анализа размеров и формы сегментов зерновки на выходе первой ступени измельчителя использовался вибрационный классификатор с набором сит.

В четвертой главе «Результаты и анализ экспериментальных исследований» представлены результаты экспериментов, выполненных в соответствии с описанными в третьей главе методиками.

Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

При измельчении зерна в центробежно-роторном измельчителе оно, ориентируясь длинной осью вдоль стенки канала, разрезается рабочими органами на сегменты толщиной 1–3 мм.

Так как толщина сегментов меньше их длины и ширины, сегмент разворачивается поверхностью среза к плоскости рабочего органа.

Срез (скалывание) сегмента зерновки на второй и последующих ступенях измельчения происходит преимущественно по поверхности предварительного среза рабочими органами предыдущей ступени.

В результате экспериментов установлено, что форма кривой одинакова для наружной поверхности зерновки и поверхности среза ее сегмента, следовательно, углы резания в данных случаях тоже должны быть одинаковыми (Рисунок 17).

По результатам проведенных исследований разработаны и экспериментально апробированы новые рабочие органы для измельчения (Рисунок 16).

Анализ результатов экспериментов (Рисунки 18 – 21) по определению затрат энергии на измельчение показал: в результате учета изменения оптимального угла резания обрабатываемого материала, при движении его в канале рабочего органа центробежно-роторного измельчителя, удельная энергоёмкость снижается в среднем на 11,9% за счет повышения производительности измельчителя на 10,7% при практически неизменном энергопотреблении.

Это подтверждает правильность теоретических предпосылок по оптимизации технологического процесса взаимодействия измельчающих элементов рабочих органов с обрабатываемым материалом в измельчителе зерна.

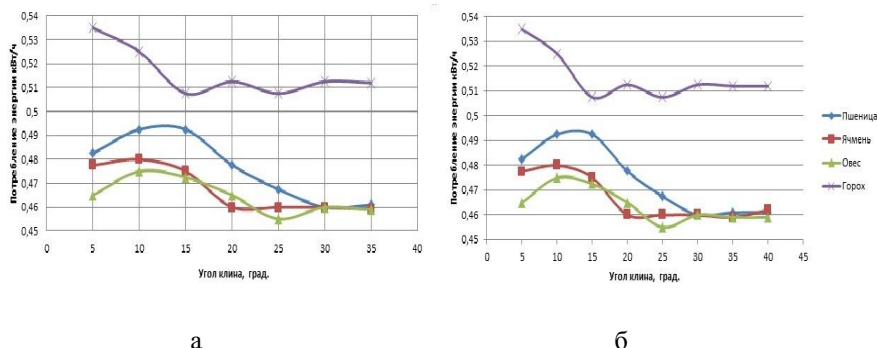


Рисунок 17 – Зависимости потребления энергии от угла клина
а – на первой; б – на второй ступени измельчения

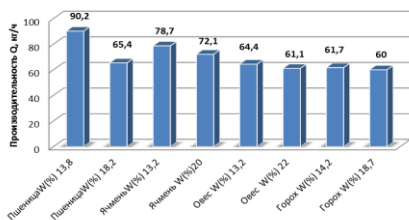


Рисунок 18 – Производительность ЦРИ на серийных рабочих органах

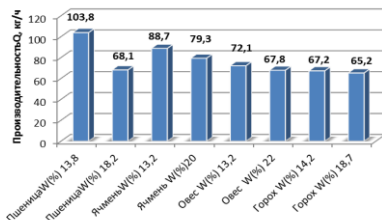


Рисунок 19 – Производительность ЦРИ на предлагаемых рабочих органах

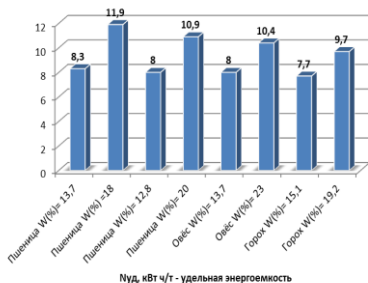


Рисунок 20 – Удельная энергоёмкость измельчения зерна на серийных рабочих органах



Рисунок 21 – Удельная энергоёмкость измельчения на предлагаемых рабочих органах

В пятой главе «Экономическая эффективность использования результатов исследования» выполнен расчет экономической эффективности от внедрения предлагаемого измельчителя с режущими элементами криволинейной формы в производство при приготовлении комбикормов из местного сырья.

Расчеты выполнены в сравнении с базовой моделью «ИЛС-0,15» – центробежно-роторным измельчителем, серийно выпускаемом в НПЦ «Агросервис», г. Челябинск.

Общие выводы

1. Теоретически и экспериментально установлено, что при движении по стенкам сквозных пазов рабочих органов измельчителя зерновка ориентируется длинной осью к направлению выхода. За счет этого она нарезается

на сегменты заданного размера, которые разворачиваются поверхностью среза к плоскости резания на второй ступени. Измельчение зерновок и их сегментов происходит преимущественно по наименьшему сечению.

2. Теоретически определено и экспериментально подтверждено рациональное использование режущих элементов в форме циклоиды с образующей окружностью 4,81 мм. Обоснована схема измельчителя фуражного зерна со стенками сквозных пазов рабочих органов, выполненных в форме циклоиды, защищенной патентом на полезную модель № 162055.

3. Анализ экспериментальных данных показывает:

а) удельная энергоемкость процесса измельчения зерновых культур снижается в среднем на 11,9% за счет повышения производительности измельчителя на 10,7% ;

б) влажность измельчаемого материала оказывает существенное влияние на удельную энергоемкость процесса измельчения, при росте влажности зерновых культур потребление энергии повышается, однако тенденция снижения энергоемкости на предлагаемых рабочих органах сохраняется;

в) в результате подбора рационального режущего клина и исполнения стенок сквозных пазов по циклоиде на сквозных пазах рабочих органов измельчителя фуражного зерна происходит выравнивание гранулометрического состава, снижение пылевидной фракции, целые зерна в продукте мола отсутствуют.

4. Полученный экономический эффект предлагаемого измельчителя фуражного зерна: за счет снижения эксплуатационных затрат на 5224,4 руб., снижения расхода энергии на 173,1 кВт · ч и удельной металлоемкости на 5,5 кг/(т/ч) расчетная годовая экономия затрат от применения измельчителя новой конструкции по сравнению с прототипом ИЛС-0,15 – 35 956,76 руб. (в ценах 2018 г.)

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК:

1. Сабиев, У.К. Сравнительный анализ устройств для измельчения зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев // Вестн. Ом. гос. аграр. ун-та. – 2016. – № 1. – С. 221–226.

2. Сабиев, У.К. Результаты работы модернизированного измельчителя / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев // Вестн. Ом. гос. аграр. ун-та. – 2017. – № 4. – С. 245–248.

3. Сабиев, У.К. Измельчитель зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев // Сельский механизатор. – 2018. – № 3. – С. 22–23.

Публикации в описаниях на изобретения, сборниках научных трудов, информационных листках:

4. Патент на полезную модель № 162055 РФ. МПК В02С 7/00, В02С 7/08. Устройство для измельчения зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев, И.У. Сабиев, В.В. Фомин; заявитель и патентообладатель «ФГБОУ ВО Омский ГАУ им. П.А. Столыпина». – Дата подачи заявки 15.01.2016, опубл. 20.05.2016, Бюл. № 14.

5. Сабиев, У.К. Модернизированный измельчитель зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев // Электрон. Науч.-метод. журн. Омского ГАУ. – 2017. – № 1 (8).

6. Сабиев, У.К. Эффективные измельчители зерна / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев, И.У. Сабиев // Сб. материалов нац. науч.-практ. конференции. – 2017 – С. 134.

7. Пушкарев, А.С. К вопросу обзора устройств для измельчения зерновых материалов / А.С. Пушкарев // Материалы Междунар. науч.-практ. конференции «Современное состояние, перспективы развития молочного животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции». – Омск, 2016.

8. Сабиев, У.К. Измельчитель зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев // Материалы Регион. студ. науч.-практ. конференции «Молодежь третьего тысячелетия». – Омск, 2016 – С. 151.

9. Сабиев, У.К. Измельчитель зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев // Материалы науч. - практ. конференции молодых ученых «Биотехнологии в сельском, лесном хозяйстве». – Омск, 2017 – С. 221–226.

10. Сабиев, У.К. Перспективные способы измельчения зерновых материалов / У.К. Сабиев, А.С. Пушкарев // Материалы научно-практической конференции «Эффективное животноводство – залог успешного развития АПК региона». – Омск, 2017. – С. 276 – 279.