

На правах рукописи

Мерзликина Наталья Викторовна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ  
НА ОСНОВЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ**

Специальность 05.20.01 –  
Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2013

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент  
**Титов Валерий Архипович**

Официальные оппоненты:

**Меновщиков Владимир Александрович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный  
аграрный университет», заведующий кафедрой  
«Технология машиностроения», профессор

**Хорош Алексей Иванович**

кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный  
технологический университет», доцент  
кафедры «Автомобили, тракторы и лесные  
машины»

Ведущая организация

ГНУ «Красноярский научно-  
исследовательский институт  
сельского хозяйства» СО Россельхозакадемии

Защита состоится «20» декабря 2013 г. в 11.30 на заседании диссертационного совета ДМ 220.037.01 при ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет» по адресу: 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90. Телефон/факс: 8(391) 227-36-09, e-mail: dissovet@kgau.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет».

Автореферат разослан 19 ноября 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 90, КрасГАУ, ученому секретарю диссертационного совета ДМ 220.037.01 Бастрону Андрею Владимировичу.

Ученый секретарь диссертационного  
совета

А.В. Бастрон

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В основе большинства современных технологий переработки органического и минерального сырья лежат процессы измельчения. При этом размеры фракций измельченного продукта нормированы соответствующими национальными стандартами или техническими условиями. При измельчении сельскохозяйственного сырья размеры фракций задаются односторонне (например, «не более») либо предельными отклонениями от интервала номинальных размеров (например,  $(1,6 - 2,0) \pm 15 \%$ ).

На процесс измельчения в устройстве (измельчителе, дробилке и т. п.) существенно влияют характеристики измельчаемого сырья (его размеры, влажность, механические свойства и др.). Сельскохозяйственные предприятия для измельчения в качестве исходного используют различное по размерам и свойствам сырье: зерновые, минеральные и витаминные добавки, кости и др. Кроме того, одно сырье может обладать различными свойствами. Например, сухое зерно является хрупким материалом, а если его влажность, более 16 %, то оно становится упруго-пластичным.

Крупные предприятия используют узкоспециализированное оборудование для измельчения сырья с определенными свойствами. Например, для измельчения сухого зерна используют молотковые (роторные) дробилки, в основе принципа работы которых лежит динамический способ дробления. Такие дробилки имеют ряд недостатков: они могут измельчать только сухое зерно, не позволяют управлять качеством измельчаемого продукта, что приводит к его переизмельчению; кроме того, производительность измельчения существенно зависит от вида сырья (пшеница, рожь, овес и т. п.); такие дробилки энергоемки.

Средние и малые предприятия, как правило, отдают предпочтение универсальным измельчителям. Универсальность измельчителей сырья предполагает реализацию в одном устройстве различных способов измельчения. Анализ литературы показал, что наиболее эффективным является способ измельчения в закрытом объеме путем совместного воздействия на сырье сжатия и сдвига, который реализован в опытных образцах измельчителей на основе торцевой зубчатой передачи (ТЗП). Для увеличения производительности измельчения наряду с торцевой зубчатой передачей может быть использована цилиндрическая зубчатая передача внутреннего зацепления (ЦЗП).

Исследования измельчителей на основе ТЗП, проведенные в Сибирском государственном аэрокосмическом университете, Сибирском федеральном университете и др., показали их способность перерабатывать широкий спектр сырья и материалов, доказали их энергоэффективность в сравнении с молотковыми (роторными) дробилками. Однако рекомендации по проектированию зубчатой передачи как исполнительного механизма измельчителей либо ограничены конкретными передачами (например, для ТЗП), либо отсутствуют (например, для ЦЗП внутреннего зацепления). Рекомендаций по назначению технологических параметров для процесса измельчения не выявлено.

Следовательно, разработка методики и аппарата проектирования исполнительных механизмов универсальных измельчителей сельскохозяйственного сырья, обоснование параметров технологического процесса измельчения являются актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Первой публикацией по исследуемому вопросу, выявленной нами, является работа ведущих ученых в области теории зубчатых зацеплений Н.И. Колчина и Ф.Л. Литвина. На основе теоремы о профильных нормалях ими спроектирована торцевая передача для масляного насоса.

Большой вклад в создание измельчителей и редукторов на основе ТЗП внес А.И. Нечаев. Он разработал торцевую передачу, ведомое колесо которой выполнено с плоскими рабочими поверхностями, а ведущее колесо – с криволинейными поверхностями. Расчеты, выполненные А.Н. Нечаевым, позволили спроектировать и изготовить на основе ТЗП ряд механизмов, таких как привод битумного насоса, малогабаритную лебедку, мельницу для измельчения материалов.

В развитие работ А.Н. Нечаева, в диссертационной работе Л.Д. Антоновой приведена основа аналитической теории зацепления, решены некоторые вопросы технологии изготовления нового вида торцевой зубчатой передачи (выпукло-вогнутого контакта) и ее модификаций, а в работе Д.Е. Груздева определены геометрические параметры зубчатой пары в зависимости от передаваемых крутящих моментов и кинематических характеристик.

Ряд работ по геометрии ТЗП и измельчителям на ее основе опубликован коллективом авторов в составе Н.В. Василенко, И.П. Бернацкого, В.А. Титова и Л.Д. Антоновой.

Полученные уравнения поверхностей зубьев колеса, шестерни, линии зацепления основаны на точечном представлении профиля зуба либо на определении радиуса его криволинейной поверхности.

**Цель исследования** – обоснование параметров и режимов работы измельчителей сельскохозяйственного сырья на основе зубчатых передач для повышения качества измельченных кормов и производительности процесса измельчения.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- провести анализ современного состояния в области проектирования устройств измельчения сельскохозяйственного сырья и обосновать направление исследований;

- разработать математическую модель, отвечающую требованиям CALS-технологий и позволяющую оперативно проектировать зубчатые передачи, выполняющие роль исполнительных механизмов измельчителей сельскохозяйственного сырья;

- обосновать параметры зубчатых передач, разработать и апробировать методику проектирования измельчителей сельскохозяйственного сырья на их основе;

- экспериментально определить режимы работы измельчителей на основе торцевой зубчатой передачи, изготовить и провести испытания опытных образцов измельчителей на основе цилиндрической передачи внутреннего зацепления;
- дать технико-экономическую оценку использования измельчителей на основе зубчатых передач при переработке различных зерновых культур.

**Объект исследования** – универсальные измельчители сырья на основе торцевой зубчатой передачи и цилиндрической передачи внутреннего зацепления.

**Предмет исследования** – процессы измельчения на измельчителях на основе торцевой зубчатой передачи и цилиндрической передачи внутреннего зацепления.

**Научную новизну работы составляют:**

1) математическая модель проектирования рабочего профиля и аппроксимирующих кривых торцевых и цилиндрических зубчатых передач как исполнительного механизма универсальных измельчителей. Данная модель позволяет оперативно получать координаты точек сопряженного профиля передачи и его визуализацию по заданным параметрам колеса и шестерни (модуль, число зубьев и т. п.);

2) аналитические зависимости, которые, в отличие от известных, позволили провести исследования производительности процесса измельчения и выработать рекомендации по выбору параметров измельчителей на основе зубчатых передач в зависимости от вида измельчаемого сырья и его характеристик, от требований к измельченному продукту и т. п.;

3) методика проектирования сопряженного профиля торцевых и цилиндрических зубчатых передач для измельчения данного типа продукта, реализующая все этапы проектирования, начиная от выбора основных параметров передачи и заканчивая выполнением рабочих чертежей.

**Практическая значимость.**

Разработанный программно-математический комплекс может быть использован для совершенствования и проектирования ТЗП и ЦЗП при создании измельчителей и других аналогичных механизмов. Разработанная методика и полученные результаты работы позволяют проектировать универсальные измельчители с учетом характеристик измельчаемого материала и требований, предъявляемых к качеству готового продукта.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в учебном процессе вузов при преподавании дисциплин: «Основы конструирования», «Основы САПР», «Механика САЕ», «Модели и методы анализа проектных решений», «Объектно-ориентированное программирование» и др.

**Методы исследования.**

При теоретическом исследовании использованы методы формализации, основанные на фундаментальных положениях теории зубчатых зацеплений, на применении математического аппарата (линейная и векторная алгебра, теория матриц, дифференциальная и аналитическая геометрия, элементы теории множеств, теория огибающих, математическое программирование и др.), а также твердотельное моделирование с применением CALS-технологий.

При экспериментальном исследовании применены статистические методы исследования многофакторных процессов.

**На защиту выносятся:**

- математическая модель для программно-математического комплекса автоматизированного проектирования зубчатых передач для создания универсальных измельчителей сельскохозяйственного сырья;

- аналитические зависимости и методики проектирования универсальных измельчителей сельскохозяйственного сырья на основе ТЗП и ЦЗП;

- результаты экспериментальных исследований, позволяющие нормировать технологические параметры при измельчении хрупкого материала на измельчителях с ТЗП;

- результаты испытаний измельчителей с исполнительным механизмом на основе ЦЗП при измельчении сельскохозяйственного сырья.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечена использованием фундаментальных положений теории зубчатых зацеплений, применением аналитических и численных методов математического анализа, использованием современных пакетов прикладных программ для создания модели ТЗП, твердотельного моделирования, результатами экспериментальных исследований процессов измельчения и проверкой работоспособности универсальных измельчителей в производственных условиях.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы докладывались на V Международной научно-практической конференции (г. Пенза, 2010), XIV Международной заочной научно-практической конференции (г. Новосибирск, 2012), V Международной конференции «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2012), VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Красноярск, 2009, 2010), на расширенном семинаре кафедры «Стандартизация, метрология и управление качеством» СФУ (г. Красноярск, 2013).

Результаты работы реализованы при выполнении в 2008 г. инновационного проекта № 70 (в рамках Программы развития СФУ на 2007–2010 гг.) «Создание универсальных дезинтеграторов на основе торцевой зубчатой передачи для измельчения широкого спектра материалов» и при выполнении в 2009–2011 гг. Государственного контракта № 02.740.11.0044 на тему «Создание параметрического ряда универсальных измельчителей, реализующих способ экструзионного измельчения, для переработки сельскохозяйственного сырья».

**Публикации.** Основное содержание работы изложено в 16 публикациях, включая 9 работ в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования, и четырех приложений. Работа содержит 148 страниц машинописного текста, 116 рисунков, 27 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи исследования и положения работы, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен анализ технологий и средств измельчения сырья и материалов, а также потребности сельскохозяйственных предприятий в оборудовании для измельчения сельскохозяйственного сырья.

Исследования показали, что 89 % фермерских хозяйств Красноярского края в своем производственном процессе так или иначе используют измельчительное оборудование. Наибольшее применение в технологических процессах измельчения находят молотковые (роторные) дробилки, принцип работы которых основан на динамических факторах – ударах молотков по измельчаемому сырью. Такая технология позволяет с заданной производительностью измельчать только хрупкий материал. Свойства сельскохозяйственного сырья, предназначенного для измельчения, зависят от его влажности. Поэтому дробильное оборудование, основанное на технологии удара, имеет технические ограничения. Так, дробилка ДБ-5 измельчает пшеницу влажностью не более 17 %, а ячмень – 12 %, дробилка ИМ-200 – не более 17 %, дробилка ДКР – не более 14 % и т. п.

Молотковые (роторные) дробилки в ряде случаев не обеспечивают требуемого качества продукта (наблюдается переизмельчение хрупкого материала, например известняка) и не в полной мере отвечают требованиям безопасности (возможность обрыва молотков при больших оборотах двигателя) и ремонтно-пригодности (при замене молотков требуется их тщательная балансировка).

Кроме того, молотковые (роторные) дробилки – довольно энергоемкие машины. Например, дробилка ДКР-3 производительностью 1 100–2 100 кг/ч оснащена электродвигателем мощностью 18,5 кВт.

На основе обзора литературных источников дан анализ существующих технологий измельчения материалов, который показал, что одной из самых эффективных технологий измельчения является измельчение в закрытом объеме путем совместного воздействия на сырье сжатия и сдвига – экструзионное измельчение. Приведен обзор измельчителей, реализующих этот способ измельчения.

Установлено, что наиболее полно эта технология реализуется в измельчителях, исполнительным механизмом которых является торцевая зубчатая передача либо цилиндрическая зубчатая передача внутреннего зацепления.

Работы по созданию измельчителей на основе ТЗП выполнены под руководством А.И. Нечаева, И.П. Бернацкого, Н.В. Василенко, В.А. Титова и других ученых. Исследований измельчителей на основе ЦЗП, запатентованных В.А. Титовым, не выявлено.

**Во второй главе** проведен анализ работ, посвященных проектированию профиля зубьев зубчатых передач как исполнительного механизма измельчителей. Для цилиндрической зубчатой передачи таких работ не выявлено. Для тор-

цевой зубчатой передачи в большинстве работ выпуклая рабочая часть профиля зуба шестерни представлена поверхностью «улитка Паскаля». В этих передачах рабочие поверхности профиля зубьев шестерни не в полной мере соответствуют теоретически выпуклым поверхностям, что приводит к нарушению плавности работы передачи. Наиболее точное представление кривой профиля зуба дается в поздних работах А.И. Нечаева, Л.Д. Антоновой и др., в которых предлагается выполнить выпуклые рабочие поверхности профиля зубьев шестерни, сопрягаемые с плоскими рабочими поверхностями зубьев колеса, по линии зацепления представляющей часть «улитки Паскаля». Такой подход к проектированию трудоемок, требует высокой квалификации и приемлем только для передач с конкретными исходными параметрами. Полученные ранее результаты по проектированию ТЗП несовместимы с современными CALS-технологиями создания машин.

При решении поставленной задачи, используя классическую теорию зубчатых зацеплений, создана адекватная математическая модель зубчатой передачи, на основе которой разработан программно-математический комплекс для автоматического проектирования передачи с заданными параметрами: модуль, число зубьев колеса и шестерни, угол наклона зубьев колеса и др. Ниже приведены основные положения исследования.

На рисунке 1 показано преобразование систем координат колеса и шестерни в процессе обкатки. Переход от системы координат, связанной с колесом  $(x_{k'}, y_{k'})$ , к системе координат, связанной с шестерней  $(x_{sh'}, y_{sh'})$ , определяется выражением

$$\begin{cases} x_{sh'} = x_{k'} \cos R\psi + y_{k'} \sin R\psi - a \sin \psi \\ y_{sh'} = -x_{k'} \sin R\psi + y_{k'} \cos R\psi - a \cos \psi \end{cases}, \quad (1)$$

где  $R\psi = \psi - \varphi$ ;

$$R = \frac{r_k}{r_{sh}} - 1;$$

$\psi$  – угол поворота в процессе обката шестерни;

$\varphi$  – угол поворота в процессе обката колеса;

$a$  – межосевое расстояние торцевой зубчатой передачи.

Линии профиля зуба колеса в системе координат колеса в параметрической форме имеет вид

$$\begin{cases} x_{k'} = u \operatorname{tg} \alpha + r_k (\sin \beta - \cos \beta \operatorname{tg} \alpha) \\ y_{k'} = u \end{cases}, \quad (2)$$

где  $u$  – вспомогательный параметр;

$\alpha$  – угол профиля зуба колеса;

$r_k$  – радиус делительной окружности колеса;

$\beta$  – угол, соответствующий длине дуги, равной половине ширины зуба колеса.

Уравнение кривой для рабочей поверхности профиля зуба шестерни, сопряженной к профилю колеса, в параметрической форме представлено в виде



$$\begin{cases} x_{sh'}(\psi) = r_k \sin(\alpha - \beta) \cos(R\psi + \alpha) + \frac{a}{R} \sin(R\psi + \alpha) \cos(R\psi + \alpha - \psi) - a \sin \psi \\ y_{sh'}(\psi) = -r_k \sin(\alpha - \beta) \sin(R\psi + \alpha) + \frac{a}{R} \cos(R\psi + \alpha) \cos(R\psi + \alpha - \psi) - a \cos \psi \end{cases}, \quad (3)$$

Разработан программно-математический комплекс проектирования профилей зубьев колеса и шестерни. В пакете MathCAD реализован расчетный модуль (программный продукт [10, 11]), который позволяет визуализировать интегрированную передачу (рисунок 2) и представить координаты точек в табличном виде. Благодаря возможностям пакета MathCAD точность полученных результатов превосходит точность современного металлорежущего оборудования с ЧПУ.

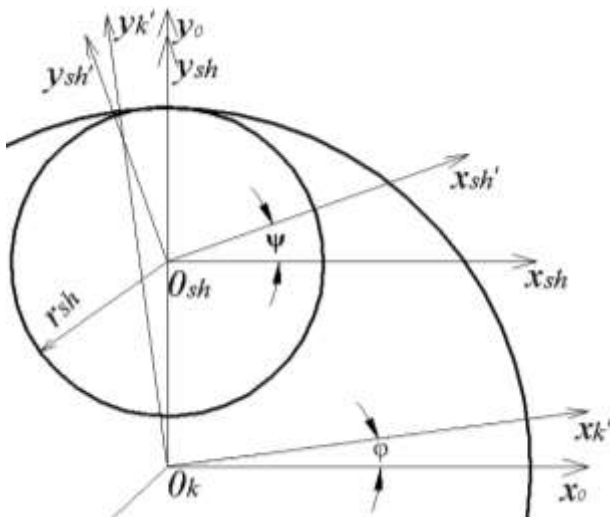


Рисунок 1 – Схема преобразования систем координат колеса и шестерни в процессе обкатки

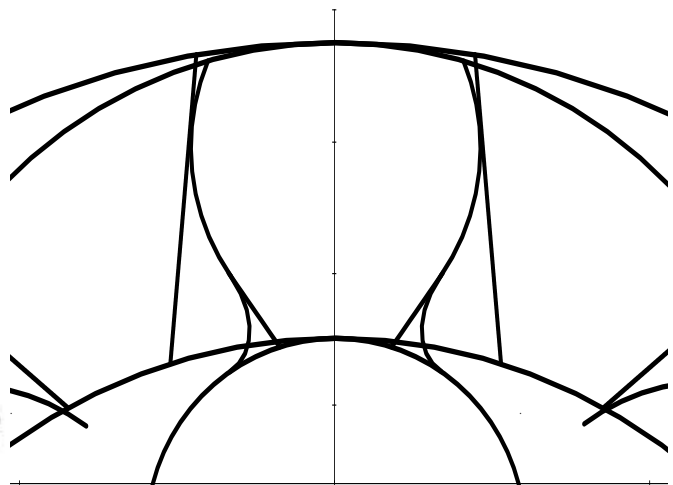


Рисунок 2 – Вид синтезированного зацепления шестерни и колеса в среднем сечении

Проведена аппроксимация криволинейных частей рабочего профиля и выкружки зуба дугами окружностей. Это позволяет при выполнении рабочих чертежей шестерни вместо координат точек профиля зуба задать координаты и величину радиусов криволинейных поверхностей рабочей части профиля и выкружки зуба шестерни.

Разработана методика проектирования колеса и шестерни ТЗП. В среде SolidWorks реализовано параметрическое построение твердотельных моделей (рисунки 3, 4), позволяющее получать рабочие чертежи деталей.

В третьей главе на основе разработанной теории зубчатых зацеплений дано обоснование выбора основных параметров измельчителей.

Для определения минимально возможного числа зубьев шестерни были синтезированы ТЗП. На рисунке 5 показаны профили зуба шестерни и впадины колеса при числе зубьев шестерни  $z_1 = 3$ ,  $z_1 = 4$ ,  $z_1 = 5$ .

Установлено минимальное передаточное отношение  $i = 1,5 \div 2,0$ , которое обеспечивает сопряженность профилей зубьев колеса и шестерни.

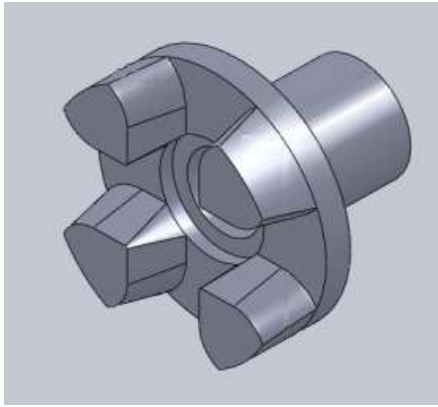


Рисунок 3 – Шестерня торцевой зубчатой передачи

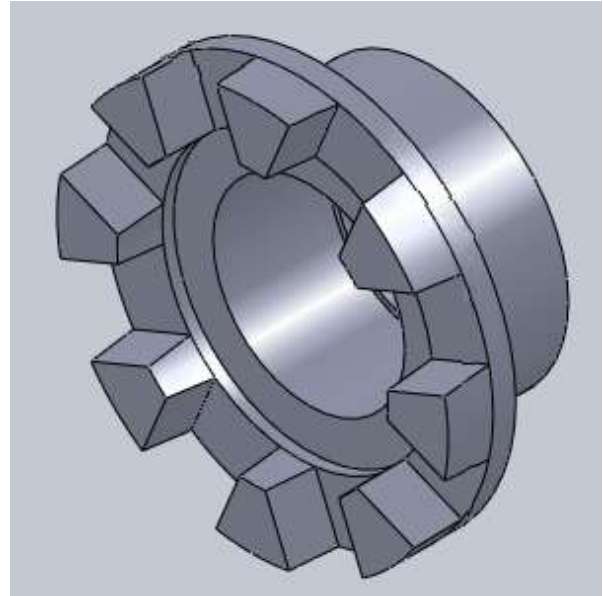


Рисунок 4 – Колесо торцевой зубчатой передачи

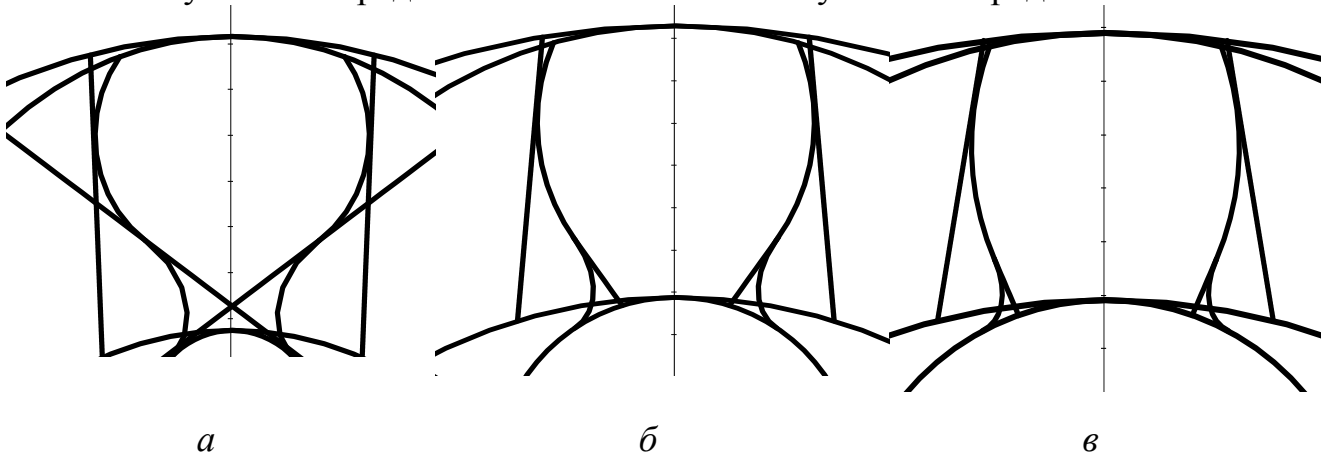


Рисунок 5 – Виды профилей зуба шестерни и впадины колеса при передаточном отношении  $i = 2$  и чисел зубьев:

$$a - z_1 = 3; \quad б - z_1 = 4; \quad в - z_1 = 5$$

Установлено, что независимо от числа зубьев шестерни с увеличением передаточного отношения уменьшается эффективная высота зуба шестерни и увеличиваются габаритные размеры измельчителя, поэтому передаточное число  $i > 2,0$  выбирать нецелесообразно.

Наиболее благоприятный профиль имеют шестерни с  $z_1 \geq 4$ . Однако увеличение числа зубьев шестерни приводит к увеличению числа зубьев колеса, а значит, и габаритных размеров. Таким образом, при отсутствии особых ограничений следует выбирать число зубьев шестерни  $z_1 = 4$ .

Установлено, что максимальное значение суммарной эффективной поверхности зуба, участвующей в процессе измельчения, достигается при углах профиля зуба колеса от  $25$  до  $35^\circ$ . Данный диапазон углов профиля зуба колеса гарантирует сопряженность в передаче и отсутствие интерференции.

Получена аналитическая зависимость для определения угла профиля зуба колеса, обеспечивающая параллельность поверхностей впадины, что позволит снизить технологические издержки и повысить точность при изготовлении колеса (особенно для цилиндрического внутреннего зацепления):

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{mz_2 \sin \beta_0}{2D + mz_2 (\cos \beta_0 - 1)} \right). \quad (4)$$

Получены аналитические зависимости, позволяющие на начальной стадии проектирования ТЗП определить значение модуля исходя как из требуемой производительности измельчения:

$$m = \sqrt[3]{\frac{8Q_M}{\rho z_1 n_1 K_1 K_2 \pi (k_a + k_f) (z_1 + z_2) \Psi_{ha} F'}} \quad (5)$$

так и из размеров измельчаемого сырья:

$$m = \sqrt[3]{\frac{c^3}{0,5(z_2 + z_1) \Psi_{ha} F'}} \quad (6)$$

Даны рекомендации по определению максимального значения высоты зуба шестерни: при  $z_1 = 4$  высота зуба шестерни  $h = 1,5m$ ; при  $z_1 = 6$  высота  $h = 2,0m$ . На форму зуба шестерни существенное влияние оказывает соотношение высот головки и ножки зуба. Наиболее приемлемым является отношение высот головки к ножке зуба 1:2.

Для торцевой зубчатой передачи рекомендуется угол наклона зуба принимать от  $10$  до  $15^\circ$ ; предельную длину зуба в зависимости от угла наклона рекомендуется определять по формуле

$$h_t = \frac{b_0 - b_t}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (7)$$

На основе проведенных исследований разработана инженерная методика расчета и проектирования основных параметров зубчатой передачи в зависимости от вида измельчаемого сырья и его характеристики, требований к измельченному продукту и технологических факторов. Методика позволяет выбрать основные параметры зубчатой передачи (модуль, число зубьев и т. п.), визуализировать профили зубьев колеса и шестерни (доказательство сопряженности профилей), определить координаты точек профилей зубьев, получить информацию о интерполяции рабочего профиля и выкружки и т. п.

При создании универсальных измельчителей на основе цилиндрической зубчатой передачи внутреннего зацепления первого и второго типоразмеров апробирована методика проектирования, приведенная выше. Характеристики измельчителей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики измельчителей

№ п/п	Параметр	Значение параметра для измельчителя	
		первого типоразмера	второго типоразмера
1	Число зубьев шестерни	4	4
2	Число зубьев колеса	8	8
3	Модуль, мм	15	30
4	Диаметр делительной окружности шестерни, мм	60	120
5	Мощность электродвигателя, кВт	4,5	7,5
6	Производительность по пшенице влажностью не более 17 %, кг/ч	500	1 000
7	Максимальная величина куска исходного сырья, мм	20×20×20	50×50×50
8	Размеры измельченной фракции, мм	0–5	0–6
9	Влажность измельчаемых зерновых и бобовых культур, не более, %	22	22

Для профилирования зубьев использован программно-математический комплекс для проектирования зубчатых передач, разработанный во втором разделе.

Графическое построение профилей колеса и шестерни приведено на рисунке 6. Определены основные параметры (радиусы, координаты их центров) аппроксимирующих кривых к рабочему профилю зуба шестерни. Графическое построение аппроксимированных поверхностей приведено на рисунке 7.

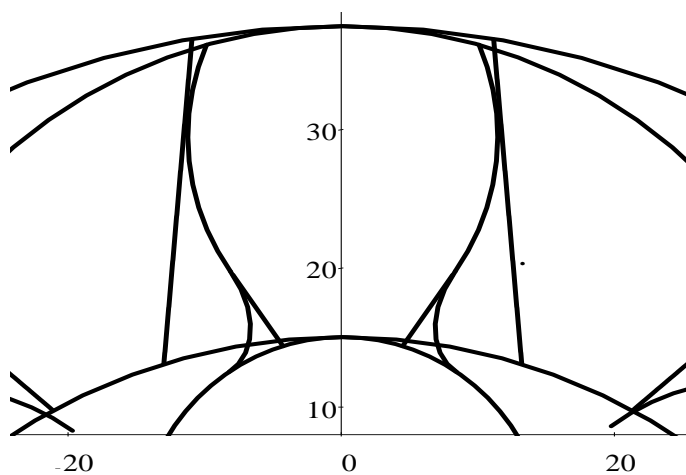


Рисунок 6 – Вид профиля колеса и шестерни

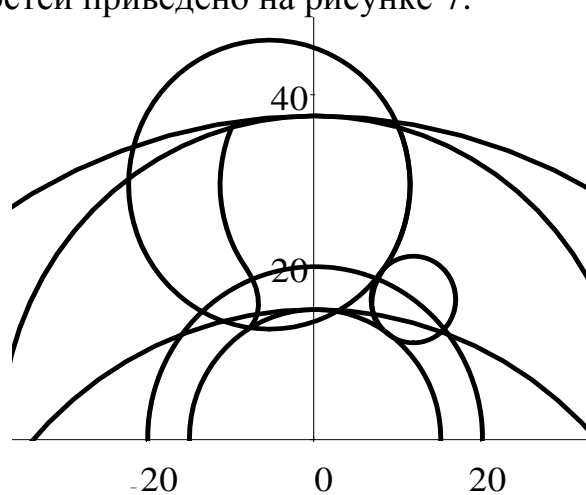


Рисунок 7 – Схема графического построения аппроксимированных поверхностей

Апробирована методика твердотельного моделирования цилиндрической зубчатой передачи (рисунок 8) и универсальных измельчителей на ее основе (рисунок 9). С помощью полученных моделей проведен анализ напряженно-деформированного состояния ответственных деталей и анализ передачи на наличие интерференции.



Рисунок 8 – Модель цилиндрической зубчатой передачи

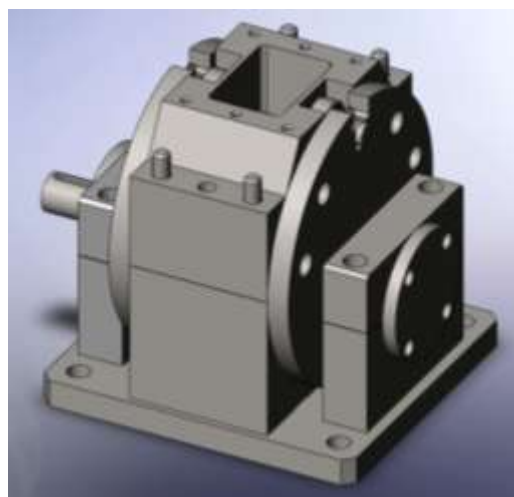


Рисунок 9 – Модель измельчителя

На основе полученных моделей спроектированы универсальные измельчители первого типоразмера производительностью до 500 кг/ч и измельчители второго типоразмера производительностью до 1 000 кг/ч.

**В четвертой главе** приведены результаты изготовления, экспериментальных исследований процессов измельчения сырья и испытаний универсальных измельчителей на основе зубчатых передач.

Создан экспериментальный стенд, в котором сочетаются возможности современного цифрового привода переменного тока (Micromaster 440 фирмы Siemens) и технологии автоматизации исследований (техника National Instruments и среда программирования LabVIEW).

На рисунке 10 показан общий вид стенда, который состоит из измельчителя 1, рамы 4, электромеханической части 2, системы управления приводом 3, аппарата регистрации данных 6 и компьютера 5.

Установлено, что процесс измельчения зависит от четырех входных параметров:

- частоты вращения шестерни ТЗП  $n$ , об/мин;
- диаметра отверстий в решетке  $d$ , мм;
- зазора между колесом и решеткой  $H_1$ , мм;
- зазора между колесом и шестерней  $H_2$ , мм.

Для оценки процесса измельчения выбраны критерии, позволяющие охарактеризовать как продукт, так и работу измельчителя. В качестве выходных параметров приняты:

- средняя степень измельчения  $I_{cp}$ ;
- работа измельчения материалов  $A$ , кДж;
- производительность измельчения материалов  $Q$ , кг/ч.

Фракционный состав оценивался в соответствии с ГОСТ 13496.8. Исследования выполнены на хрупком материале – известняке. Такой выбор материала обусловлен тем, что при его измельчении на молотковых (роторных) дробилках не удается управлять размерами измельчаемого сырья, что приводит к его переизмельчению.

Исследования выполнены с применением теории планирования эксперимента. Для исследования процесса измельчения при четырех входных параметрах был выбран некомпозиционный план второго порядка, предусматривающий проведение 27 опытов.

Пример фракционного состава продукта, полученного при измельчении известняка, приведен на рисунке 11.

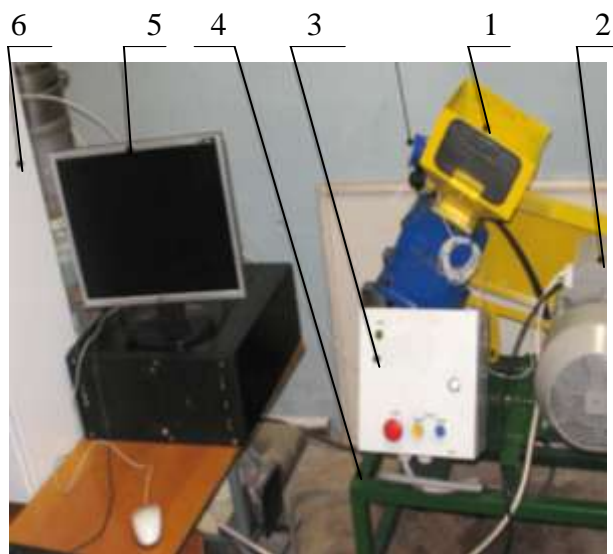


Рисунок 10 – Общий вид экспериментального стенда

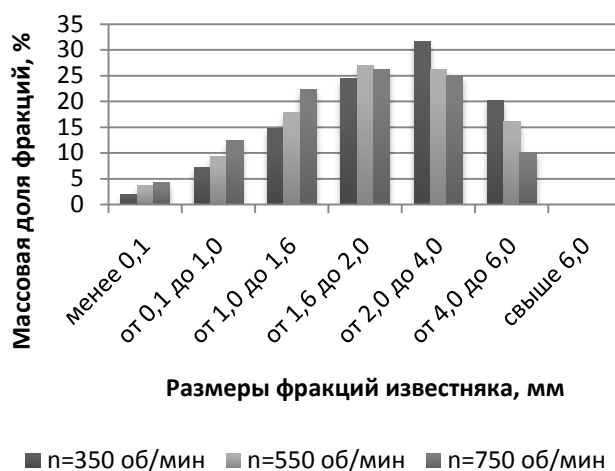


Рисунок 11 – Фракционный состав измельченного известняка

Исследования показали, что фракционный состав хрупкого материала (известняка) существенно зависит от размеров отверстий в решетке и числа оборотов ведущего вала ТЗП. Зазор между колесом и решеткой ( $H_1$ ) и зазор между колесом и шестерней ( $H_2$ ) на фракционный состав измельченного хрупкого сырья влияют незначительно (в пределах 6,0–7,7 %).

Для описания процесса измельчения получены статистические модели. Уравнение регрессии для средней степени измельчения известняка имеет вид

$$Y_I = 14,547 - 5,235X_1 + 2,227X_1X_2, \quad (8)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  – кодовое обозначение частоты вращения приводного вала и диаметров отверстий в решетке соответственно.

Работа, совершаемая при измельчении известняка, прямо пропорциональна числу оборотов ведущего вала ТЗП и обратно пропорциональна диаметру отверстий в решетке. Получено уравнение регрессии для определения работы при измельчении известняка

$$Y_A = 71,165 + 38X_1. \quad (9)$$

Выявлены следующие закономерности влияния входных параметров на степень измельчения:

1. Фракционный состав измельченного материала на 75–85 % определяется диаметром отверстий в решетке-сепараторе.

2. Зазоры между колесом и решеткой, между колесом и шестерней не оказывают существенного влияния на процесс измельчения. Их следует выбирать с учетом погрешностей изготовления, температурных расширений в процессе работы измельчителя и др.

3. Число оборотов вращения ведущего вала ТЗП прямо пропорционально влияет на производительность измельчения. При этом фракционный состав изменяется в пределах 10–12 %.

На следующем этапе проведены исследования по измельчению пшеницы и овса с различной влажностью. Исследована производительность измельчения пшеницы влажностью 8,6 и 21,8 % (рисунок 12). По аналогии были проведены исследования при измельчении овса влажностью 9,5 и 20,3 %.

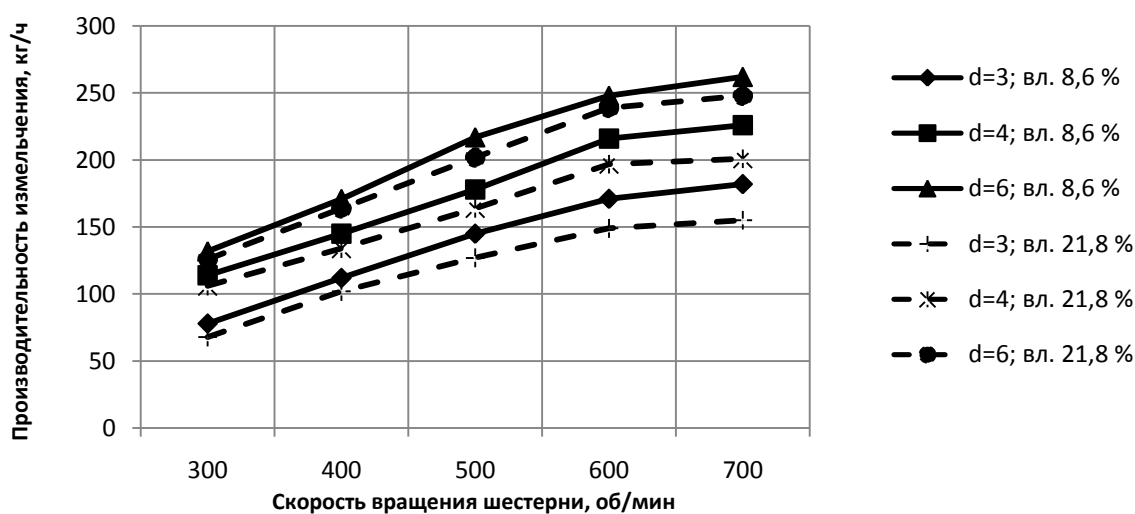


Рисунок 12 – Изменение производительности измельчения пшеницы влажностью 8,6 % (сплошные линии) и 21,8 % (пунктирные линии)

Важным выводом является то, что измельчению подлежит зерно с высокой влажностью (более 14–17 %). Установлено, что при измельчении зерна различных свойств на измельчителе на основе ТЗП, производительность может меняться в пределах 27 %, тогда как при измельчении на молотковых (роторных) дробилках – до 52 %.



Таким образом, определены характеристики процесса измельчения хрупкого материала (известняк, сухое зерно) и пластичного материала (влажное зерно) с заданными выходными параметрами.

Опытные образцы универсальных измельчителей на основе ЦЗП изготовлены Федеральным государственным унитарным предприятием «Красноярский опытный завод Российской академии сельскохозяйственных наук».

Испытания измельчителей подтвердили достоверность теоретических и экспериментальных исследований, проведенных диссертантом. При предварительных испытаниях выявлено, что измельчители по всем проверяемым параметрам соответствуют установленным требованиям. Результаты испытаний подтверждены протоколами и актами испытаний. Процесс измельчения пшеницы показан на рисунке 13, а результаты измельчения приведены на рисунке 14.

Испытания измельчителя на сельскохозяйственном предприятии показали, что его эксплуатационные характеристики по универсальности, производительности и удельным энергозатратам превосходят характеристики молотковых (роторных) дробилок, применяемых на сельхозпредприятиях.



Рисунок 13 – Процесс измельчения пшеницы



Рисунок 14 – Измельченная пшеница влажностью 21,8 %

**В пятой главе** дано технико-экономическое обоснование измельчителей на основе зубчатых передач. Эффективность разработки измельчителя определена путем сравнения себестоимости измельчения одной тонны зерна с использованием серийно выпускаемыми дробилками ДКР-0,5М и ДКР-1М и разработанными измельчителями на основе ЦЗП. Годовой экономический эффект составляет от 160 до 860 тыс. руб. в зависимости от типоразмера измельчителя и свойств измельчаемого сырья. Наибольший эффект отмечается при измельчении влажной пшеницы, так как исключается процесс сушки зерна.



## **Выводы.**

1. По результатам анализа технологий и средств измельчения сырья и материалов обоснована актуальная задача по проектированию и разработке универсальных измельчителей на основе зубчатых передач, которые реализуют наиболее эффективный способ измельчения – экструзионное измельчение.

2. Разработанная математическая модель для проектирования профиля и аппроксимирующих поверхностей торцевой зубчатой передачи и цилиндрической передачи внутреннего зацепления позволила создать программно-математический комплекс, обеспечивающий:

- визуализацию сопряженной зубчатой передачи;
- получение координат точек профилей зубьев колеса и шестерни;
- аппроксимацию кривых профиля зубьев;
- оперативную корректировку параметров для достижения необходимого профиля зуба.

3. Теоретические исследования позволили обосновать параметры измельчителей сельскохозяйственного сырья на основе зубчатых передач:

- число зубьев шестерни –  $4 \div 6$ ;
- передаточное отношение –  $1,5 \div 2,3$ ;
- угол наклона профиля зуба колеса –  $25 \div 35^\circ$ ;
- высота зуба шестерни – от 1,5 до 2 модулей;

и разработать и апробировать методику проектирования измельчителей сельскохозяйственного сырья.

4. На основании экспериментальных исследований измельчителей с торцевой зубчатой передачей определены режимы их работы и установлено, что:

- переизмельчение известняка на измельчителе с торцевой зубчатой передачей не превышает 15–25 %, тогда как на молотковых дробилках переизмельчение достигает 75 %;

- производительность измельчения зависит от свойств измельчаемого сырья. В измельчителях с ТЗП такое изменение находится в пределах 27 %, тогда как при измельчении на молотковых (роторных) дробилках – до 52 %;

- измельчители на основе зубчатых передач способны измельчать зерно с высокой влажностью (более 17 %), тогда как молотковые и роторные дробилки влажное зерно не измельчают.

5. По результатам проектирования были изготовлены и испытаны опытные образцы двух типоразмеров измельчителей на основе цилиндрической зубчатой передачи внутреннего зацепления. Измельчитель первого типоразмера: производительность – до 500 кг/ч; размеры измельчаемого куска материала –  $20 \times 20 \times 20$  мм. Измельчитель второго типоразмера: производительность – до 1 000 кг/ч; размеры измельчаемого куска материала –  $50 \times 50 \times 50$  мм. Испытания показали, что их эксплуатационные характеристики по универсальности и производительности превосходят характеристики молотковых (роторных) дробилок, и подтвердили достоверность исследований и рекомендаций, приведенных в работе.

6. Проведенная оценка эффективности использования измельчителей на основе зубчатых передач в сравнении с серийно выпускаемыми дробилками ДКР-0,5М и ДКР-1М показала, что экономический эффект составляет от 160 до 860 тыс. руб. в зависимости от типоразмера измельчителя и свойств измельчаемого сырья.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Использование возможностей торцевой зубчатой передачи для измельчения материалов [Текст] / В.А. Титов, В.С. Секацкий, Н.А. Колбасина, Н.В. Мерзликина // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2009. – № 4. – С. 99–105.

2. Титов, В.А. Дезинтегратор для нужд сельского хозяйства. Исследование процессов измельчения [Текст] / В.А. Титов, Н.В. Мерзликина // Вестн. КрасГАУ. – 2009. – Вып. 11. – С. 166–170.

3. Титов, В.А. Исследование процессов измельчения в дезинтеграторе [Текст] / В.А. Титов, Е.В. Остроглядова, Н.В. Мерзликина // Вестн. КрасГАУ. – 2009. – Вып. 12. – С. 161–164.

4. Экспериментальное исследование многофункциональных возможностей измельчителя на основе торцевой зубчатой передачи [Текст] / В.А. Титов, Н.В. Мерзликина, Ю.А. Пикалов, В.С. Секацкий // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2010. – Т. 12 (33). – № 1(2). – С. 556–559.

5. Колбасина, Н.А. Современный подход к проектированию торцевых зубчатых передач и измельчителей материалов на их основе [Текст] / Н.А. Колбасина, Н.В. Мерзликина, В.А. Титов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва. – 2010. – Вып. 2 (28). – С. 134–136.

6. Построение трехмерной параметрической модели торцевой зубчатой передачи для измельчителя материалов [Текст] / Н.В. Мерзликина, Д.И. Морозов, Н.А. Колбасина, В.А. Титов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва. – 2010. – Вып. 6 (32). – С. 52–55.

7. Экспериментальный стенд на базе техники Siemens и технологий National Instruments для исследования измельчителя материалов [Текст] / В.А. Титов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – № 1. – С. 119–124.

8. Программно-математический комплекс для создания специальных зубчатых передач измельчителей [Текст] / В.А. Титов, Н.А. Колбасина, Н.В. Мерзликина, В.С. Секацкий, Ю.А. Пикалов // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2011. – Т. 13. – № 6. – С. 246–251.

9. Грануляторы сырья, состояние и перспективы / В.А. Титов, Ю.А. Пикалов, В.С. Секацкий, Н.В. Мерзликина [Текст] // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва. – 2012. – Вып. 6 (46). – С. 197–200.

### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

10. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012619863 от 31.10.2012. Программа расчета координат и построения профиля зубьев колеса и шестерни торцевой зубчатой передачи с учетом угла поворота колеса / Н.В. Мерзликина, В.А. Титов, Н.А. Колбасина, В.С. Секацкий.

11. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012619824 от 31.10.2012. Расчетный модуль для определения координат точек профиля колеса и шестерни специальной торцевой зубчатой передачи / Н.В. Мерзликина, В.А. Титов, Н.А. Колбасина, В.С. Секацкий.

### **Научные работы, опубликованные в других изданиях:**

12. Управление качеством измельчаемого сырья и производительностью работы на универсальном измельчителе с торцевой зубчатой передачей [Текст] / Н.В. Мерзликина, Ю.А. Пикалов, В.А. Титов, В.С. Секацкий // Управление качеством в современной организации: тр. V Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2010.– С. 73–76.

13. Мерзликина, Н.В. Методика разработки технических условий новой продукции на примере универсального измельчителя [Текст] / Н.В. Мерзликина, С.В. Прусак // Молодежь и наука: тр. VI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск, 2010. – С. 24–27.

14. Мерзликина, Н.В. Разработка устройства измерения давления в рабочей зоне универсального измельчителя [Текст] / Н.В. Мерзликина, Ю.А. Пикалов // Молодежь и наука: тр. VI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск, 2010. – С. 28–29.

15. Комплексное исследование исполнительного механизма универсальных измельчителей материалов [Текст] / Н.В. Мерзликина, В.А. Титов, В.С. Секацкий, Ю.А. Пикалов, Н.А. Колбасина // Проблемы механики современных машин: мат-лы V Междунар. конф. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. – Т. 1. – С. 84–89.

16. Современный подход создания оригинальных зубчатых передач для измельчителей сырья и материалов [Текст] / Н.В. Мерзликина, В.А. Титов, Н.А. Колбасина, В.С. Секацкий, Ю.А. Пикалов // Технические науки – от теории к практике: мат-лы XIV Междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Сибирская ассоциация консультантов, 2012. – С. 30–41.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 13.11.2013. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.

Печать – ризограф. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 860

Издательство Красноярского государственного аграрного университета  
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117