

На правах рукописи

ПЕПЕЛЯЕВА ЕВГЕНИЯ ВАЛЕРЬЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭКСТРУДИРОВАНИЯ
ЗЕРНА ОЗИМОЙ РЖИ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЭКСТРУДЕРА**

Специальность 05.20.01 – технологии и средства механизации
сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киров – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова».

Научный руководитель: **Трутнев Михаил Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова», доцент кафедры сельскохозяйственных машин и оборудования.

Официальные оппоненты: **Коновалов Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет», профессор кафедры «Технология машиностроения»; **Казakov Владимир Аркадьевич**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный аграрный университет».

Защита состоится 20 апреля 2017 г. в 13 часов 30 минут на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 006.048.01 в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» по адресу: 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а, ауд.426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» и на официальном сайте института: niish-sv.narod.ru.

Автореферат разослан ___ февраля 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Глушков Андрей Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди существующих технологий производства кормов находит все более широкое применение способ экструдирования. При экструзии зерновой материал подвергается комплексному воздействию давления, температуры и сдвиговых деформаций. В результате происходят глубокие биохимические превращения питательных веществ: декстринизация крахмала до глюкозы, изменяется структура клетчатки, нейтрализуются антипитательные вещества, происходит стерилизация корма, улучшаются вкусовые качества. Применение кормов, полученных способом экструдирования, способствует повышению усвояемости, переваримости и более полному использованию питательных веществ организмом животных.

Изменения, происходящие в экструдированном сырье, зависят от режимов процесса экструзии, которые определяет возникающее в этом случае комплексное физико-механическое воздействие на материал. Однако в литературных источниках практически отсутствует информация о зависимости кормовых качеств зерновых продуктов от воздействий, оказываемых на них в процессе экструзии.

Исследование влияния физико-механических воздействий, присутствующих при экструзии (интенсивность сдвига, температура, давление) на кормовые качества крахмалсодержащего сырья является актуальной задачей, решение которой позволит целенаправленно выбирать конструктивные параметры экструдера и технологические режимы с учетом показателей кормового качества.

Степень разработанности. Весомый вклад в исследование и оптимизацию процесса экструдирования внесли Г. Шенкель, Э. Бернхард, З. Тадмор, Дж. Мейз, Р.В. Торнер и др. Последующее развитие теории экструзии получила в работах M.L. Voou, Ch.I. Ching, V. Elbirly, J.T. Lindt, H. Potente, J. Martin, В.А. Силина, В.И. Янкова, М.Л. Фридмана, С.Н. Михайлова, Д.М. Мухаметгалеева, В.С. Кима, В.В. Скачкова, А.А. Татарникова, Е.В. Славнова, О.И. Скульского, Т.А. Дидык, А.Н. Острикова, О.В. Абрамова, А.С. Рудометкина Т.М. Зубковой, В.П. Ханина, К.А. Фисенко, В.А. Сысуева, Л.И. Кедровой, В.Д. Кобылянского и других исследователей. Изучив труды ученых, можно сделать вывод, что метод экструзионной обработки зерновых продуктов позволяет получить хорошо усвояемые, термостерилизованные, с улучшенными вкусовыми свойствами кормовые продукты. Однако в работах не оценивается влияние параметров на кормовые качества обрабатываемого зернового материала, то есть, нет связи технологических параметров процесса экструдирования с критериями требуемого качества экструдата.

Цель исследований. Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса экструзии путем определения зависимости кормового качества продукта от комплексного физико-механического воздействия (скорости сдвига, температуры, давления).

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие **задачи исследований**:

1. Предложить математическую модель, позволяющую определять зависимости скорости сдвига, температуры и давления, воздействующих в процессе экструзии на перерабатываемый материал, от режимов экструзии, геометрических параметров экструдера и вязких свойств сырья.

2. Обосновать и разработать конструктивно-технологическую схему и конструкцию установки физико-механического воздействия на обрабатываемый материал, методику и метод ее использования для определения эффективных режимов воздействия на обрабатываемый материал, повышающих питательность продукта.

3. Исследовать влияние и установить зависимости кормовой ценности зернового материала от параметров физико-механического воздействия в процессе экструзии. Определить эффективные параметры физико-механического воздействия, повышающие кормовую ценность экструдата дерты ржи.

4. Проверить работоспособность экструдера при обоснованных режимах воздействия на дерту ржи.

5. Определить эффективность применения экструдированного зерна озимой ржи в качестве кормового продукта.

Научная новизна:

- математическая модель процесса экструзии зерновых продуктов в интегральных характеристиках (среднее по сечению давление, средняя массовая по сечению температура, объемный расход - аналог средней по сечению скорости сдвига) на основании решения задачи неизотермического течения материала с вязкостью, зависящей от скорости сдвига и температуры;
- метод и установка определения качественных показателей продукта в результате воздействия на него сдвигом, температурой и давлением. Способ и устройство защищены патентом на изобретение №2408883 РФ
- закономерности изменения показателей качества экструдата (содержание свободных глюкозы и аминокислот) от скорости сдвига, температуры, давления и времени их воздействия;
- результаты сравнительного анализа исходного зерна и экструдированного зерна озимой ржи, полученные методом атомно-силовой микроскопии на нанометрическом уровне.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- методика и устройство комплексного физико-механического воздействия на зерновой материал могут использоваться при определении влияния этих воздействий на другие биопродукты, а также при иных способах их обработки. Патент на изобретение №2408883 РФ;
- содержащиеся в диссертации научные положения и выводы позволяют на стадии разработки обосновать конструктивные и технологические параметры работы экструдеров для переработки зернового материала;

- материалы диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Пермская ГСХА;
- рекомендации по производству экструдированного зерна озимой ржи, утвержденные Министерством сельского хозяйства Пермского края;
- предложенный способ экструдирования фуражного зерна, позволяет экономить энергию, затрачиваемую на сушку свежесобранного зерна и исключить операции измельчения и увлажнения зерна перед экструдированием. Патент на изобретение № 2429712 РФ.

Методология и методы исследований. В работе использованы методы инженерной реологии, методы системного исследования, методы математической статистики и моделирования, методы планирования и обработки результатов эксперимента, методы определения качества зерновых кормов, методы биохимических исследований кормов.

Объект исследования: технологический процесс экструдирования зерновых продуктов на одношнековом экструдере, с учетом физико-механических воздействий, характеризующих этот процесс.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса экструзии зерновых продуктов в интегральных характеристиках, полученная на основании решения задачи неизотермического течения материала с вязкостью, зависящей от скорости сдвига и температуры.

2. Метод и установка, моделирующие физико-механические воздействия на материал в процессе экструзии определения качественных показателей продукта в результате воздействия на него сдвигом, температурой и давлением.

3. Математические модели, описывающие зависимость кормовых качеств увлажненной дерти озимой ржи от комплексного физико-механического воздействия (скорость сдвига, температура, давление).

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: LXVIII, LXXIII, LXXIV, LXXV Всероссийских научно-практических конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодежная наука: технологии, инновации». (г. Пермь – 2008, 2013, 2014, 2015 гг.). XIII Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей «Знания молодых: наука, практика и инновации». (г. Киров – 2014 г). II Всероссийской конференции «Технологии послеуборочной обработки зерна в зонах рискованного земледелия» (г. Пермь – 2014г.) LV Международной научно-практической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск – 2016 г).

По основным положениям диссертации опубликовано 14 статей, в том числе три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК. Разработаны рекомендации по производству и скармливанию зерна озимой ржи, рекомендованные Министерством сельского хозяйства Пермского края. Получено 2 патента РФ на изобретение.

Работа выполнена на кафедре технологического и энергетического оборудования в соответствии с планом научно-исследовательской работы

ФГБОУ ВО Пермская ГСХА и является разделом темы №15 «Создание высокоэффективных и безопасных технологий и технических средств для производства пропашных культур, подготовки кормов, семенного материала и продукции животноводства в условиях Западного и среднеуральского региона России» (номер государственной регистрации 01201151685).

Исследования проводились на базе специализированной лаборатории Института механики сплошных сред УрО РАН и Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН.

Производственные исследования по скармливанию полученного на лабораторном экструдере экструдированного зерна озимой ржи проводились в ООО «Семеновское» Агрохолдинга «Ашатли» Очерского района Пермского края при участии сотрудников отдела животноводства Пермского НИИСХ.

Структура и объемы работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 158 страниц, включает 122 страницы основного текста, 39 рисунков, 19 таблиц и 7 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткое обоснование актуальности темы диссертационной работы, приведена теоретическая и практическая значимость результатов, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи научных исследований» на основе данных литературных источников проведен анализ процесса экструдирования зерновых продуктов и изменение их свойств в процессе экструзии, рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования, приведены критерии оценки кормовых качеств.

В процессе экструзии на продукт осуществляется воздействие сдвигом, давлением, повышенными температурами. При этом нет постоянных значений температуры, давления, а для конических шнеков и сдвига, они меняются вдоль канала шнека в широком диапазоне. Кроме того, изменять один из параметров, не изменяя остальные, практически невозможно. Основные характеристики экструдера закладываются при проектировании, в ходе которого необходимо представлять, какие физико-механические воздействия и как влияют на кормовые качества готового продукта.

В работе предложено в качестве критериев оценки кормовой ценности экструдата использовать содержание свободной глюкозы – как главного энергетического компонента пищи животных и содержание свободного аминокислота – как критерия доступности низкомолекулярных пептидных соединений и аминокислот для пищеварительного тракта животных.

На основании вышеизложенного необходимо разработать метод и установку, позволяющую моделировать физико-механические воздействия, оказываемые на материал внутри экструдера, при этом задавать и контролировать изменения этих воздействий, с целью исследования влияния их на кормовые качества материала.

По результатам проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе «Теоретическое описание процесса экструзии зерновых продуктов» описано течение в развернутом на плоскость канале шнека, предложена математическая модель процесса экструзии зерновых продуктов в интегральных характеристиках.

Классический подход к моделированию течения в одношнековых экструдерах сводится к описанию течения в развернутом на плоскость канале шнека. Определяющими соотношениями являются уравнение сохранения массы, уравнения движения (1 а,б), уравнение неразрывности (2), уравнение сохранения энергии (3), реологическое уравнение состояния (4):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right], \quad (1a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right], \quad (1б)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\rho C_p \left[v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \lambda \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \right] = \Phi, \quad (3)$$

$$\eta = \mu_0 I_2^{-n} \exp(-bT), \quad (4)$$

где v , p , T – поля скорости, давления и температуры соответственно;

ρ – плотность материала, кг/м³;

C_p – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности;

Φ – диссипативная функция;

η – эффективная вязкость;

I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации;

μ_0 , n , b – параметры материала.

Течение материала в винтовом экструдере ставится в «обращенном движении» (шнек неподвижен, а корпус вращается). Винтовой канал разворачивается на плоскость. Нижняя граница полученного плоского канала остается неподвижной, а верхняя двигается с заданной скоростью под углом к продольной оси. Продольная составляющая потока в этом случае является результатом тянущего движения стенки и встречного градиента давления, возникающего за счет гидродинамического сопротивления формирующего инструмента.

Рассмотрим плоскую модель, представляющую собой среднее сечение межреберного канала (рисунок 1). Систему координат будем считать жестко связанной со шнеком. В этой системе верхняя граница, представляющая внутреннюю поверхность корпуса, будет иметь заданную скорость

$$u_x = r\omega\cos\varphi \quad (5)$$

где r – наружный радиус шнека, м;
 ω – угловая скорость вращения шнека, c^{-1} ;
 φ – угол подъема винтовой линии шнека, град.

Для несжимаемых и слабо сжимаемых жидкостей объединение уравнения баланса масс, сохранения импульса и связи между напряжениями и скоростями деформации приводит к уравнению Навье-Стокса. Решение задачи в двумерной постановке для нахождения полей скоростей сдвига, давлений и температуры может быть получено только численными методами. Задача может быть упрощена введением некоторых допущений и переходом к интегральным характеристикам.

Следуя классическому подходу, рассмотрим течение материала в прямом прямоугольном канале с подвижной верхней стенкой. Материал будем считать линейной несжимаемой жидкостью, вязкость которой зависит от температуры. Так как длина канала на два порядка больше его глубины и ширины, течение в канале будем считать одномерным.

Введем в канале прямоугольную систему координат $OXYZ$, ось OX направим вдоль линии развертки канала шнека, ось OY вертикально, OZ перпендикулярно OX (рисунок 1). Обозначим через v_x – поле скорости; $p(x)$ – среднее давление по поперечнику канала с координатой x ; $\mu(x)$ – динамическая вязкость материала.

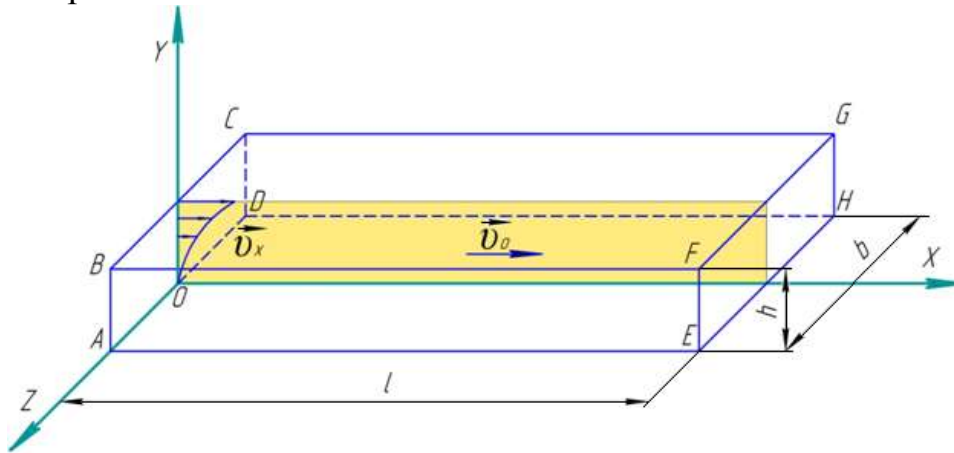


Рисунок 1 – Схема течения материала между соседними витками шнека

Для несжимаемой жидкости в стационарном течении уравнения движения в канале примут вид

$$\frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (6)$$

Краевые условия для (6):

$$v_x(0, y, z) = V_0(y, z), \quad (7)$$

$$v_x(x, y, 0) = v_x(x, y, b) = v_x(x, 0, z) = 0, \quad (8)$$

$$v_x(x, h, z) = u_x, \quad (9)$$

$$P(0, y, z) = P_0. \quad (10)$$

где $V_0(y, z)$ – поле скорости на входе канала,
 b – ширина канала, м;

h – глубина канала, м.

u_x – проекция скорости подвижной верхней стенки канала на его продольную ось.

Уравнение (6) с краевыми условиями в выражениях (7) – (10) определяет одномерное течение несжимаемой вязкой жидкости в прямоугольном канале с движущейся верхней стенкой. Для линейной жидкости поле скорости такого течения можно рассматривать как суперпозицию поля скорости течения, вызванного в отдельности движением верхней стенки канала и поля скорости течения, вызванного наличием градиента давления $\frac{dP(x)}{dx}$. Обозначим через v_{kx} и v_{px} поля скоростей указанных течений. Ненапорное течение, вызванное движением верхней стенки, будем называть куэттовским, напорное – пуазейлевским. При рассмотрении нелинейной жидкости справедливость принципа суперпозиции можно принять в качестве допущения, в том случае, когда скорость сдвига и соответственно вязкость не сильно изменяются в поперечном сечении канала.

Отметим, что в реальных технологических режимах характер течения материала близок к куэттовскому, и указанное допущение можно считать справедливым. В любой точке канала:

$$v_x = v_{kx} + v_{px}. \quad (11)$$

Интегрируя (11) по поперечнику канала, получим:

$$Q(x) = Q_k(x) + Q_p(x), \quad (12)$$

где $Q(x)$ - суммарный расход жидкости по каналу шнека, м³/с;

$Q_k(x)$ - секундный объемный расход куэттовского течения, м³/с;

$Q_p(x)$ - секундный объемный расход пуазейлевского течения, м³/с.

Для куэттовского расхода имеем:

$$Q_k(x) = 0,5u_xhb, \quad (13)$$

Связь величины пуазейлевского расхода с градиентом давления получим с помощью приближенной формулы гидравлики для прямоугольной трубы:

$$H = -\frac{10\vartheta}{3g}lv\frac{A^2+B^2}{A^2B^2}, \quad (14)$$

где H – падение давления в миллиметрах столба жидкости;

A и B – полуоси прямоугольного сечения, м;

L – длина трубы, м;

g – ускорение свободного падения;

ϑ – кинематическая вязкость, Па·с;

v – средняя скорость течения жидкости, м/с.

Заменяв в последней формуле l на dx , A на $h/2$, B на $b/2$, умножив на плотность материала ρ и ускорение g , учитывая, также, что $Q_p(x) = hbv$ получим: $\Delta P(x) = -\frac{40}{3}\rho\vartheta Q_p(x)\frac{h^2+b^2}{h^3b^3}dx$.

Устремив dx к нулю и заменяя произведение $\vartheta\rho$ динамической вязкостью μ , выразим градиент давления в канале через расход пуазейлевского течения:

$$\frac{dP(x)}{dx} = -\frac{40}{3}\mu Q_p(x)\frac{h^2+b^2}{h^3b^3}. \quad (15)$$

Учитывая (12)-(15), для течения в канале шнека получим окончательно:

$$\frac{dP(x)}{dx} = \frac{40}{3} \mu 0,5 u_x(x) \frac{h^2+b^2}{h^2b^2} - \frac{40}{3} \mu \frac{h^2+b^2}{h^3b^3} Q(x). \quad (16)$$

Дополним изотермическую модель течения оценкой температурных эффектов.

Введем поле температуры в канале шнека. Ввиду того, что длина канала шнека гораздо больше его ширины и глубины в любом сечении, будем считать поле температуры однородным по любому поперечному сечению, перпендикулярному оси Ox . Кроме того будем пренебрегать теплопроводностью вдоль канала шнека по сравнению с теплопереносом. Выделим в канале малый параллелепипед, ограниченный поперечными сечениями с координатами x и $x + \delta x$.

Через сечение, пересекающее ось Ox в точке с координатой x в выделенный объем за единицу времени втекает количество теплоты $\rho c_p Q(x)T(x)$, а через второе ограничивающее параллелепипед сечение пересекающее ось в точке $x + \delta x$ вытекает количество теплоты $\rho c_p Q(x + \delta x)T(x + \delta x)$. Разница указанных тепловых потоков обусловлена диссипацией энергии в выделенном объеме и теплообменом с верхней стенкой (шнек считается адиабатическим). Оценим эти величины.

Для оценки диссипации примем, что профиль скорости течения материала в среднем сечении канала совпадает с таковым в случае течения в плоской щели:

$$v_x = -\frac{1}{2\mu(x)} \frac{dP(x)}{dx} (y^2 - yh) + \frac{u_x}{h} y \quad (17)$$

Объемная плотность мощности диссипации равна:

$$e_d(y) = \mu \left(\frac{\partial v_x(y)}{\partial y} \right)^2. \quad (18)$$

Подставим выражение для скорости из (17) в уравнение (18) и проинтегрируем его по высоте канала, умножая получившийся интеграл на ширину и длину рассматриваемого элемента, получим оценку мощности диссипации в нем:

$$E_d(x) = \left[\frac{h^3}{12\mu(x)} \left(\frac{dP(x)}{dx} \right)^2 + \frac{\mu u_x^2}{h} \right] b \delta x. \quad (19)$$

Определим тепловой поток сквозь верхнюю стенку в канал пропорционально разнице температур жидкости и стенки, соответствующая мощность равна:

$$E_w(x) = \alpha_w (T_w(x) - T(x)) b \delta x, \quad (20)$$

где $T(x)$ - температура материала в канале, К;

$T_w(x)$ - распределение температуры на верхней стенке канала, К;

α_w - коэффициент теплоотдачи.

Записывая разницу тепловых потоков при $\delta x \rightarrow 0$, получим уравнение баланса тепла в канале:

$$\rho c_p \frac{d(Q(x)T(x))}{dx} = \left[\frac{h^3}{12\mu(x)} \left(\frac{dP(x)}{dx} \right)^2 + \frac{\mu u_x^2}{h} \right] b + \alpha_w (T_w(x) - T(x)) b. \quad (21)$$

При рассмотрении температурных эффектов будем использовать степенную зависимость вязкости от температуры:

$$\mu(x) = \mu_0 e^{-\alpha(T(x)-T_0)}, \quad (22)$$

где μ_0 - динамическая вязкость материала при температуре T_0 .

Решив систему уравнений (16, 21, 22), например, методом изложенным в программном комплексе «SqPolySolve» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013610385) при конкретных краевых условиях и свойствах материала, можно найти интересующие распределения интегральных характеристик по длине канала шнека, а именно распределения средних по поперечному сечению канала температуры, давления и вязкости материала.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложена программа и методика определения свойств исходного материала, а также исследований влияния физико-механических воздействий в процессе экструзии на кормовые качества получаемого экструдата, приводится описание лабораторной установки и работы на ней.

Экспериментальные исследования свойств исходного материала проводились в соответствии с ГОСТами (ГОСТ 13586.5-93, ГОСТ 13496.8 – 72, ГОСТ 3040-55 и др.) СТО АИСТ 19.2-2008 и общепринятыми методиками определения кормовых свойств биопродуктов.

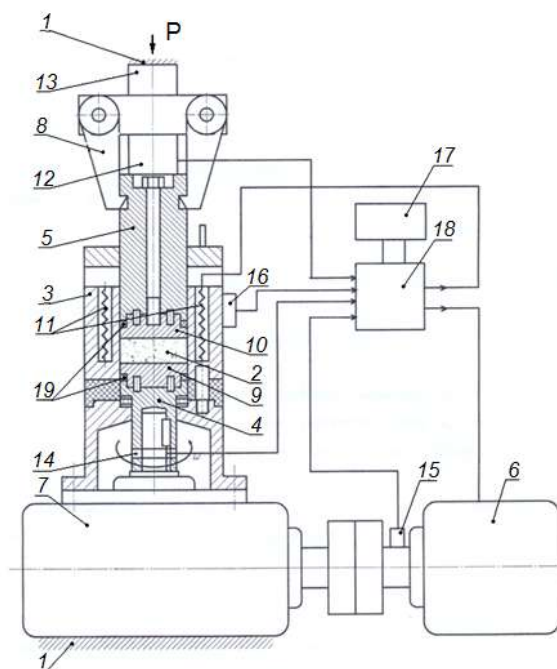
В процессе экструзии на продукт осуществляется воздействие сдвигом, давлением, повышенными температурами. Эти же воздействия, но только фиксируя и контролируя их изменение в процессе эксперимента, возможно приложить к продукту, используя лабораторную установку (рисунок 2). Кроме того, можно задать время этих воздействий и необходимую влажность продукта.

Исследуемый образец помещается в рабочую камеру 2 установки и на него осуществляется тепловое воздействие нагревательными элементами 11 через стенки цилиндра 3 рабочей камеры и механическое воздействие двумя плунжерами, один из которых, а именно верхний 5 перемещается в осевом направлении и создает необходимое давление, а нижний 4 вращается в окружном направлении, что позволяет создавать и регулировать скорость сдвига. Воздействие на образец осуществляется определенный интервал времени, по истечению которого воздействие прекращается и образец вынимается и исследуется на содержание кормовых качеств. Экспериментальная установка оборудована датчиками, позволяющими с определенной точностью задавать и контролировать усилие на верхнем плунжере и его перемещение, момент на нижнем плунжере и его угловую скорость вращения, температуру цилиндра, и регистрировать текущее время. По измеренным параметрам вычисляется давление, эффективная скорость сдвига, эффективная вязкость, мощность, затраченная на воздействие сдвигом.

На полученных образцах в лаборатории института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН определялись значения критериев оценки кормовых качеств экструдата: количество свободной глюкозы и свободного азота.



а)



б)

Рисунок 2 – Общий вид а) и схема лабораторной установки б):

1 – основание; 2 – рабочая камера; 3 – цилиндр; 4 – нижний плунжер; 5 – верхний плунжер; 6 – электродвигатель; 7 – редуктор; 8 – захваты; 9,10 – рабочие диски; 11 – электронагреватель; 12 – датчик усилия; 13 – датчик перемещения; 14 – датчик крутящего момента; 15 – датчик частоты вращения нижнего плунжера; 16 – датчик температуры цилиндра; 17 – компьютер; 18 – блок управления; 19 – уплотнительные кольца

Использование лабораторной установки дает возможность моделировать воздействия, оказываемые на материал в канале экструдера, и исследовать их влияние на критерии кормовых качеств получаемого продукта, тем самым предлагаемый метод позволяет устанавливать связь между комплексным физико-механическим воздействием на биопродукт и его кормовой ценностью.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты исследований свойств исходного материала (дёрть зерна озимой ржи), а также результаты исследований влияния физико-механических воздействий, возникающих в процессе экструзии, на кормовые качества получаемого экструдата, проведенные на экспериментальной установке и лабораторном экструдере.

Таблица 1 - Факторы, уровни и интервалы варьирования

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	нижний	средний	верхний	
	-1	0	+1	
Давление, МПа	1	2,5	4	1,5
Скорость сдвига, с ⁻¹	5	12,5	20	7,5
Время воздействия, с	50	100	150	50

Факторы, уровни и интервалы их варьирования (таблица 1) выбирали на основании анализа литературных источников, предварительных исследований, а также на основании поисковых опытов.

В ходе эксперимента влажность дерти зерна озимой ржи задавали $23 \pm 2\%$, температуру в рабочей камере поддерживали на уровне $130 \pm 5^\circ\text{C}$.

В соответствии с планом Бокса-Бенкена составлена матрица эксперимента, приведенная в таблице 2, здесь же представлены результаты анализов содержания свободных глюкозы и аминокислот, а также мощности, затраченной на сдвиговое воздействие.

Таблица 2 – Результаты исследований на лабораторной установке

№ опыта	Давление, МПа	Скорость сдвига, с^{-1}	Время воздействия, с	Свободная глюкоза, мг%	Свободный аминокислот, мг%	Мощность, Вт
	p (X1)	$\dot{\gamma}$ (X2)	T (X3)	gl (Y1)	amin (Y2)	N (Y3)
Исходная рожь				69,7	2,6	-
1	0	0	0	156	5,2	25,7
2	-1	-1	0	92,7	4,19	4,42
3	1	-1	0	96,3	4,65	10,3
4	-1	1	0	93,5	3,48	17,79
5	1	1	0	88,3	3,92	40,18
6	-1	0	-1	91,4	5,52	13,5
7	1	0	-1	96,2	3,48	25,41
8	0	0	0	156,8	5,4	25,7
9	-1	0	1	96,5	4,07	14,53
10	1	0	1	96,2	3,18	23,86
11	0	-1	-1	92,15	4,37	8,98
12	0	1	-1	90,96	4,07	27,7
13	0	-1	1	88,4	4,07	6,35
14	0	1	1	94,9	3,92	32,31
15	0	0	0	156,15	5,6	25,7

Обработка опытных данных производилась с помощью лицензионных пакетов компьютерных программ STATGRAPHICS Plus 4.0, Microsoft Excel. После обработки результатов проведенного многофакторного эксперимента получены следующие уравнения регрессии для описания поверхности отклика содержания свободной глюкозы Y1, содержания свободного аминокислота Y2 и мощности, затраченной на сдвиговое воздействие Y3:

$$Y1 = 156,317 + 0,363 \cdot X1 - 0,236 \cdot X2 + 0,661 \cdot X3 - 30,072 \cdot X1^2 - 33,545 \cdot X2^2 - 31,170 \cdot X3^2, \quad (23)$$

$$Y2 = 5,4 + 0,254 \cdot X1 + 0,236 \cdot X2 + 0,275 \cdot X3 - 0,693 \cdot X1^2 - 0,648 \cdot X2^2 - 0,645 \cdot X3^2, \quad (24)$$

$$Y3 = 25,7 + 6,189 \cdot X1 + 10,991 \cdot X2 - 3,519 \cdot X1^2 + 4,128 \cdot X1 \cdot X2 - 4,009 \cdot X2^2 + 1,81 \cdot X2 \cdot X3 - 2,856 \cdot X3^2. \quad (25)$$

По полученным уравнениям регрессии построены следующие графические зависимости (рисунки 3...5):

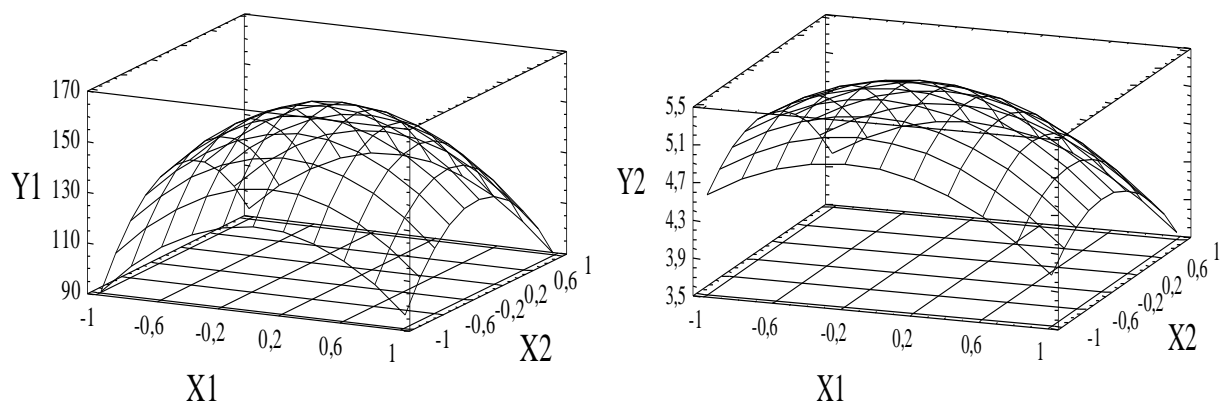


Рисунок 3 – Графики зависимости содержания глюкозы – Y1 и содержания свободного аминокислота – Y2 от давления – X1 и скорости сдвига – X2

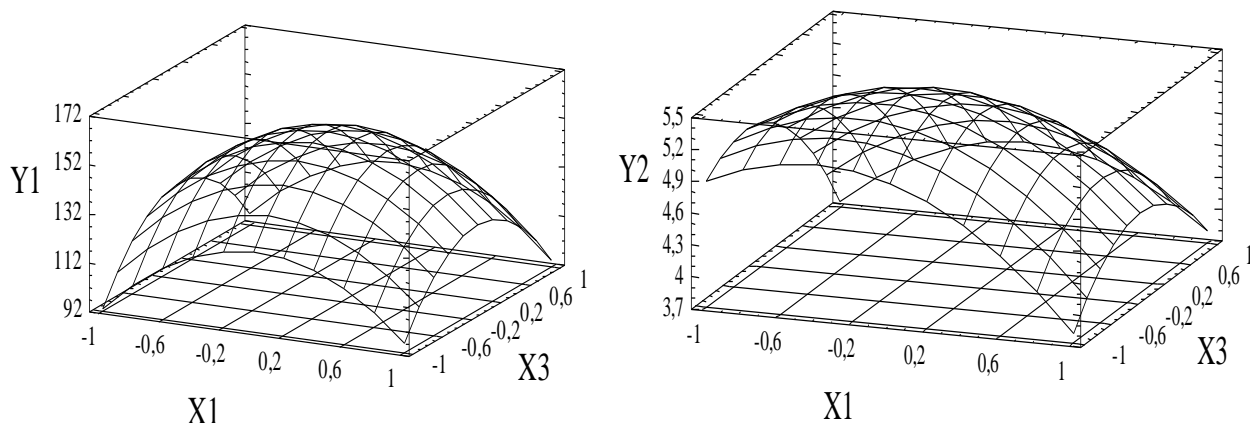


Рисунок 4 – Графики зависимости содержания глюкозы – Y1 и содержания свободного аминокислота – Y2 от давления – X1 и времени воздействия на материал – X3

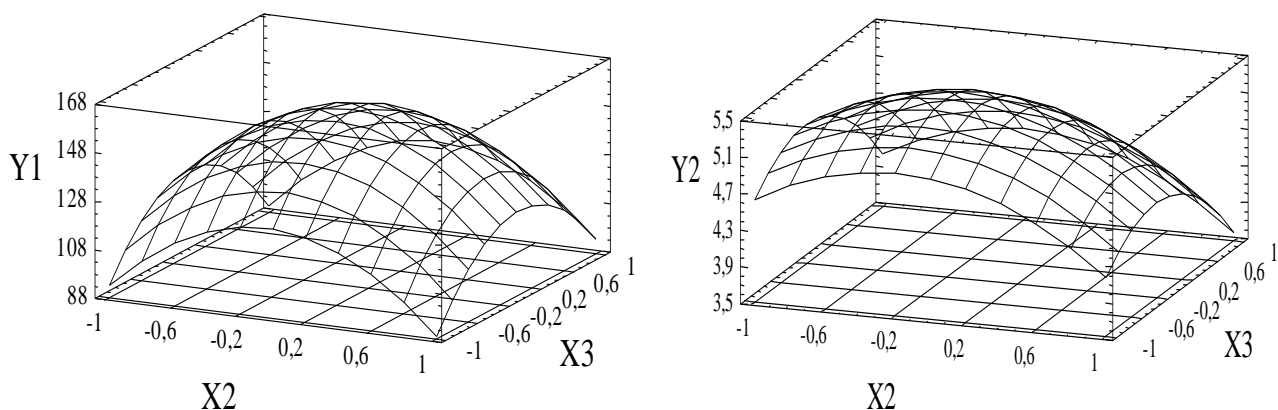
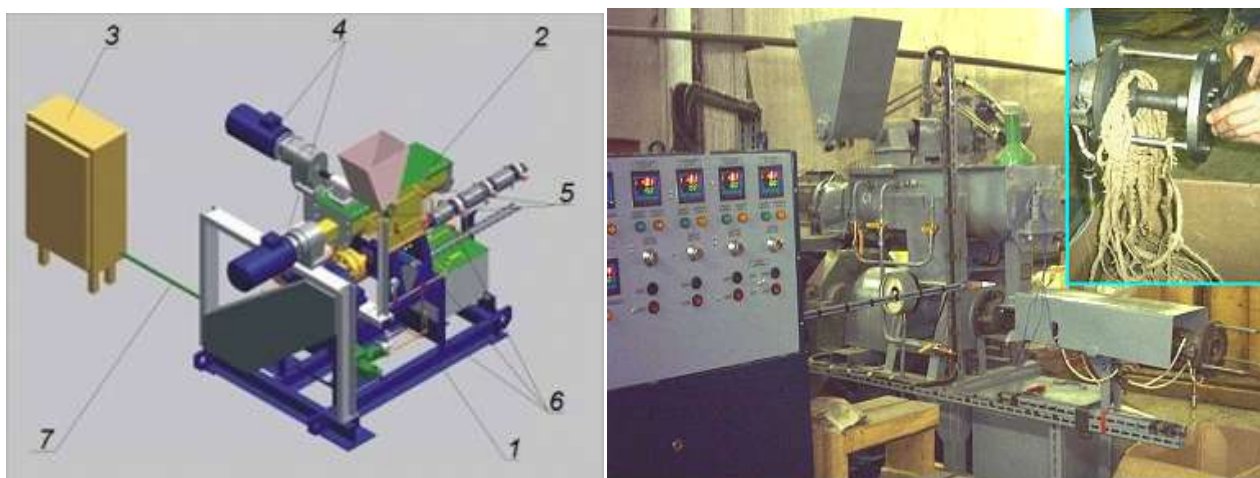


Рисунок 5 – Графики зависимости содержания глюкозы – Y1 и зависимости содержания аминокислота – Y2 от скорости сдвига – X2 и времени воздействия – X3

Анализируя зависимости изменения содержания кормовых качеств (свободных глюкозы и аминокислота) зерна озимой ржи от физико-механических воздействий, следует отметить, что в диапазоне рациональных значений параметров, при влажности исходного материала $W=23\pm 2\%$, давлении в рабочей камере $P=1,5...3\text{МПа}$, эффективной скорости сдвига от 7 до 15с^{-1} ,

времени воздействия внешних факторов на материал от 50 до 100 с, при температуре в рабочей камере $130 \pm 5^\circ\text{C}$ наблюдается увеличение содержания как свободной глюкозы в 2-2,5 раза (более 150 мг%), так и свободного аминокислота в 1,5-2 раза (более 4 мг%) по сравнению с исходным зерном.

Проверку рациональных режимов процесса экструдирования, полученных при проведении и обработке экспериментов на лабораторной установке, проводили на экструзионной установке переработки зерна ЭУПЗ (рисунок 6) в специализированной лаборатории УРО РАН «Института механики сплошных сред». Испытания предусматривали определение кормовых показателей экструдата и энергетических показателей экструдера при работе в диапазоне обоснованных режимов воздействия на материал.



a)

б)

Рисунок 6 – Схема (*a*) и общий вид (*б*) ЭУПЗ:

- 1 – блок экструзионный; 2 – блок подготовки зерна; 3 – шкаф системы контроля и управления; 4 – мотор-редуктор; 5 – форсунки водные;
6 – трубопроводы системы подачи воды; 7 – комплект кабелей

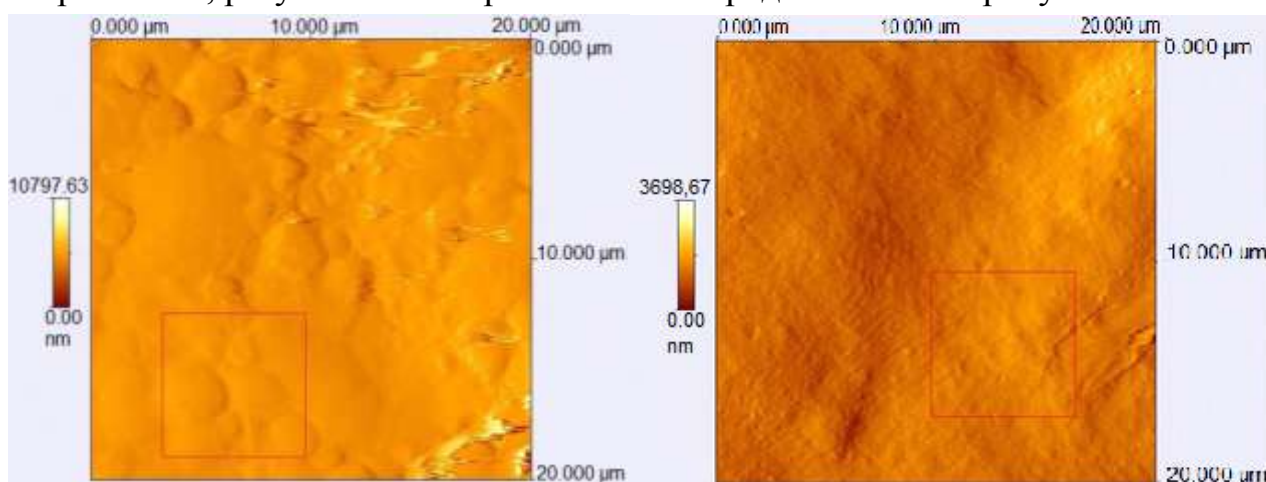
В ходе испытаний задавали и поддерживали следующие параметры: влажность материала, температуру в рабочей зоне экструдера, давление в зоне прессования, частоту вращения шнека и фиксировали время нахождения материала в процессе экструдирования. Опыт повторяли в трехкратной последовательности.

В полученном экструдате определяли содержание свободной глюкозы и свободного аминокислота (таблица 3). Результаты данного эксперимента показали, что в процессе экструдирования, при диапазоне оптимальных параметров, содержание кормовых веществ увеличивается и находится в ожидаемых пределах, т.е. в 2-2,5 раза увеличивается содержание свободной глюкозы и в 1,5-2 раза свободного аминокислота по сравнению с исходным материалом, что подтверждает верность лабораторным исследований

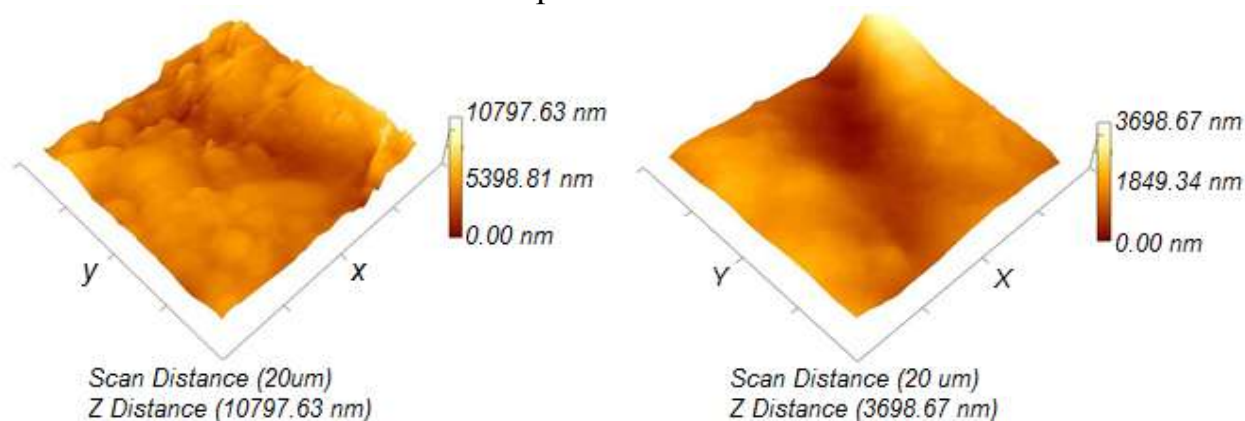
Таблица 3 - Результаты исследований на ЭУПЗ

№	Влажность, %	Средняя температура, °С	Давление, МПа	Частота вращения шнека, мин ⁻¹	Содержание свободной глюкозы, мг%	Содержание свободного аминокислота, мг%	Мощность привода, кВт
Исходная рожь					70,8	2,6	-
1	23,0	130	4,2	90	190,8	3,44	14
2	23,2	135	3,6	90	171,16	4,8	14
3	23,1	129	4	90	178,77	3,25	14
Ср. значение	23,1	131	3,8	90	180,24	3,83	14

После проведения экспериментальной части исследования с целью визуального сравнительного анализа структуры исходного зерна и экструдата (полученного при оптимальных параметрах) была проведена атомно-силовая микроскопия, результаты которой частично представлены на рисунке 7.



2-D изображения 20x20 мкм



3-D изображение 20x20 мкм

Рисунок 7 - Структура препаратов из перемешанных смесей зерна (слева) и экструдата (справа)

Справа от изображения расположена цветовая шкала величины профиля поверхности в размерности нанометров, соответствующая своему изображению. Размер изменения рельефа препарата экструдата по сравнению с препаратом зерна в размере сканирования 20x20 мкм меньше в 3 раза и

составляет 3698нм у экструдата и 10797нм у зерна. Эта закономерность прослеживается во всех исследуемых образцах. По результатам этих исследований можно отметить, что структура экструдата в наномасштабе мельче и глядя на изображение – более однородна. По результатам атомно-силовой микроскопии можно сделать вывод, что экструзионная обработка приводит к перестройке и микронизации структуры компонентов зерна. Это согласуется с полученными биохимическими данными, подтверждающими разрушение структуры пищевых биополимеров что приводит к значительному увеличению пищевой ценности экструдата.

В пятой главе приведены результаты производственных испытаний и оценка технико-экономической эффективности применения экструдата, полученного на лабораторном экструдере при оптимальных технологических параметрах.

Производственный эксперимент проводили в ООО «Семеновское» Агрохолдинга «Ашатли» Очерского района Пермского края при участии сотрудников зоотехнического факультета Пермской ГСХА и отдела животноводства Пермского НИИСХ. По результатам производственных исследований сотрудниками Пермского НИИСХ рекомендовано использовать экструдированную рожь для кормления дойных коров без ограничений, при этом наблюдается увеличение надоев на 0,25% и повышение жирности молока на 0,14%. Расчетная экономическая эффективность применения экструдированного зерна озимой ржи составила 915,98 тыс. руб. на 100 голов дойных коров в год при замене концентратной части рациона кормов на экструдированное зерно озимой ржи.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Предложенная математическая модель физико-механического воздействия на обрабатываемый материал в канале экструдера на основе полученных теоретических выражений позволяет по заданной геометрии рабочих органов, свойствам продукта, кинематике температур и конкретных краевых условиях найти распределение средних по поперечному сечению канала основных интегральных технологических характеристик процесса (среднее давление p , средняя температура T , аналог среднего сдвига η).

2. Обоснованная и разработанная конструктивно-технологическая схема и конструкция лабораторной установки физико-механического воздействия на обрабатываемый материал, методика и метод ее использования (патент РФ №2408883) позволили определить эффективные режимы воздействия на обрабатываемый материал, повышающие питательность продукта: увеличение содержания свободной глюкозы в 2-2,5 раза, свободного аминокислота в 1,5-2 раза по сравнению с исходным зерном.

3. Установлены зависимости, позволяющие оценивать содержание свободных глюкозы и аминокислота от комплексного физико-механического воздействия на дерть зерна озимой ржи в диапазоне параметров: $\dot{\gamma} = 5-20\text{с}^{-1}$, $p = 1-5\text{МПа}$, $T = 50-150\text{с}$ при влажности материала $W = 23\%$ и температуре

$t = 135 \pm 5^\circ\text{C}$. Обоснованы эффективные параметры физико-механического воздействия ($p = 1,5 \dots 3 \text{ МПа}$, $\dot{V} = 7 \dots 15 \text{ с}^{-1}$, $T = 50 \dots 100 \text{ с}$, $t = 130 \pm 5^\circ\text{C}$) обеспечивающие при обработке увеличение содержания свободной глюкозы до 150 мг% и свободного аминокислота до 4 мг% по сравнению с исходным продуктом.

4. Экструдер, работающий на обоснованных режимных параметрах (при влажности дерти ржи $23 \pm 2\%$, температуре $130 \pm 5^\circ$, давлении $3,2 \dots 4,0 \text{ МПа}$ и частоте вращения шнека 150 мин^{-1}) обеспечивает повышение в среднем содержания свободной глюкозы с 70,8 до 180,8 мг% и свободного аминокислота с 2,6 до 3,8 мг%.

5. Расчетная экономическая эффективность применения экструдированного зерна озимой ржи составит 915,98 тыс. руб. на 100 голов дойных коров в год при замене концентрированной части рациона кормов на экструдированное зерно озимой ржи.

Рекомендации производству:

При приготовлении кормов методом экструдирования (особенно из зерна озимой ржи) нужно тщательно следить за соблюдением технологических режимов при производстве экструдата для улучшения кормовых показателей.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- исследовать влияние физико-механических воздействий, оказываемых на материал в процессе экструзии, для других зерновых культур;
- с целью снижения энергозатрат на получение экструдированных кормов исследовать технологию экструдирования фуражного зерна естественной влажности, патент №2429712.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Наноструктурные изменения зерна озимой ржи в процессе экструзии / Е.В. Пепеляева и др. // Аграрный вестник Урала: Всероссийский аграрный журнал. - 2010. - № 5. - С. 75-78.

2. Славнов, Е.В. Экструзионная переработка свежееубранного зерна естественной влажности / Е.В. Славнов, Е.В. Пепеляева, М.А. Трутнев // Аграрный вестник Урала: Всероссийский аграрный журнал. - 2012. - № 8. - С. 49-50.

3. Пепеляева, Е.В. Реологические свойства увлажненной крошки озимой ржи / Е.В. Пепеляева, Е.В. Славнов, Н.В. Трутнев // Пермский аграрный вестник : научно-практический журнал. - 2016. - № 4. - С. 71-76.

Статьи в сборниках научных трудов

4. Пепеляева, Е.В. Основные сферы применения экструдеров в сельском хозяйстве и пути их совершенствования / Е.В. Пепеляева, И.Н. Колобов, М.А. Трутнев // Пермский аграрный вестник: сборник научных трудов / ПГСХА. LXVI Всероссийская науч.-практическая конф. молод.уч. аспирантов и студентов «Вклад молодых ученых в развитие АПК» (10-12 апреля 2007года,

Пермь).- Пермь : Изд-во ФГБОУ ВПО «Пермская ГСХА» , 2007. - Часть 2- С. 68-70.

5. Истомина, М. А. Биоэнергетическая оценка способов обработки кормов / М.А. Истомина, Е.В. Пепеляева // Пермский аграрный вестник : сборник научных трудов / ПГСХА. LXVII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов "Энергия и знания молодых - аграрному сектору" (19 - 20 марта 2008 года ; Пермь). - Пермь : Изд-во ПГСХА, 2008. - Часть 2. - С. 21-23.

6. Пепеляева, Е. В. Влияние процесса экструдирования на качественные показатели экструдата озимой ржи / Е. В. Пепеляева, Е. В. Славнов // Инновационный потенциал аграрной науки - основа развития АПК / ПГСХА. Всероссийская науч.-практ. конференция, посвященная 90-летию с.-х. образования на Урале. - Пермь : Изд-во ПГСХА, 2008. - Часть I. - С. 267-269

7. Пепеляева, Е.В. Экструзионная переработка свежееубранного зерна / Е.В. Пепеляева, А.И. Панышев, Н.А. Морозков // Инновации аграрной науки - предприятиям АПК : сборник материалов: в 3 частях / Пермская ГСХА. Межд. науч.-практ. конф. (24-25 апреля 2012 года; Пермь) . - Пермь : Изд-во Пермская ГСХА, 2012. - Часть II. - С. 135-138.

8. Пепеляева, Е.В. Установка для определения влияния параметров процесса экструдирования на пищевые качества конечного продукта / Е.В. Пепеляева, М.А. Трутнев, Е.В. Славнов // Молодежная наука: технологии и инновации: сборник материалов: в 2 частях / Пермская ГСХА. Межд. науч.-практ. конф.-Пермь: Изд-во Пермская ГСХА, 2008. - Часть 2, – С. 58-60.

9. Производство и скармливание экструдированного зерна озимой ржи: рекомендации/ В.А. Ситников, М.А. Трутнев, Е.В. Пепеляева, Н.А. Морозков, Е.В. Славнов Е.В. и др.; М-во с.-х. Пермского края, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, Гос. науч. учреждение «Пермский науч.-исслед. ин-т с.х.» Россельхозакадемии. – Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2012. – 32 с.

10. Чугуевская, О.А. К выбору датчиков для лабораторной установки / О.А. Чугуевская, Е.В. Пепеляева // Молодежная наука 2012: технологии, инновации : сборник материалов: в 3 частях / ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. Всерос. науч.-практ. конф. (13-14 марта 2012 года; Пермь). - Пермь : Изд-во Пермская ГСХА, 2012. - Часть 3. - С. 296-299.

11. Пепеляева, Е.В. Влияние параметров экструзионной обработки на содержание свободной глюкозы в зерне озимой ржи / Е.В. Пепеляева, М.А. Трутнев // Пермский аграрный вестник : научно-практический журнал. - Пермь : Изд-во Пермская ГСХА, 2013. - N 4. - С. 28-31.

12. Пепеляева, Е.В. Влияние параметров экструзионной переработки на содержание аминокислот в зерновых продуктах / Е.В. Пепеляева // Молодежная наука 2013: технологии, инновации: сборник материалов: в 3 частях / ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. LXXIII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (11-15 марта 2013 года; Пермь). - Пермь : Изд-во Пермская ГСХА, 2013. - Часть 3. - С. 342-345.

13. Глебов, Д.А. Шнековые экструдоры и возможные пути их совершенствования / Д.А. Глебов, Е.В. Пепеляева // Молодежная наука 2014: технологии, инновации : сборник материалов: в 4 частях/ ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. Всероссийская науч.-практическая конф. «Молодежная наука 2014: технологии, инновации» (11-14 марта 2014 года; Пермь). - Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрост», 2014. - Часть 4. - С 42-45.

Патенты на изобретения

14. Патент на изобретение №2408883 РФ, МПК G01N 33/02. Способ определения зависимости пищевой ценности биопродукта от параметров физико-механического воздействия на него и устройство для этого/ Е.В. Славнов, А.И. Судаков, Е.В. Пепеляева, В.П. Коробов, М.А. Трутнев (РФ). - №2009102462/13; Заявлено 26.01.2009// Бюл. №22. – 10.08.2010. – 8 с.

15. Патент на изобретение №2429712 РФ, МПК G01N 33/02. Способ экструзионной переработки фуражного зерна/ Е.В. Славнов, М.А. Трутнев, Е.В. Пепеляева (РФ). - №2010121103/13; Заявлено 25.05.2010// Бюл. №27. – 27.09.2011. – 5 с.

Подписано в печать 09.02.2017. Формат 60x84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ №16

Отпечатано в ИПЦ «Прокростъ»
Пермской государственной сельскохозяйственной академии
имени академика Д.Н. Прянишникова
614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23,
тел. (342) 210-35-34