

Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный аграрный университет»

*На правах рукописи*

**Мартынова Дарья Владимировна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА  
ЭКСТРУДИРОВАННЫХ КОРМОВЫХ ПРОДУКТОВ ЗА СЧЕТ  
ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКА ПРЕСС-  
ЭКСТРУДЕРА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат  
технических наук, доцент  
**В.П. ПОПОВ**

Оренбург 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	11
1.1 Анализ влияния химического состава кормов на мясную продуктивность сельскохозяйственных животных.....	11
1.2 Анализ существующего оборудования для производства экструдированных кормовых продуктов.....	14
1.3 Анализ конструктивных особенностей шнеков пресс- экструдеров.....	17
1.4 Анализ химических и структурно-механических преобразований в экструдруемом материале.....	24
1.5 Анализ существующих математических моделей и методологий описания экструзионных процессов.....	29
1.6 Заключение по обзору источников литературы.....	36
Цели и задачи исследования.....	39
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРЕ .....	41
2.1 Теоретическое обоснование конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека.....	41
2.2 Разработка математической модели уплотнения материала в экструдере.....	44
2.2.1 Разработка математической модели для зоны плавления....	45
2.2.2 Разработка математической модели для зоны дозирования.....	52
Выводы по второй главе.....	61
3 МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	63

3.1 Экспериментальная установка, приборы и оборудование, применяемые при исследованиях.....	64
3.2 Объект исследования.....	71
3.3 Методы проведения экспериментальных исследований.....	71
3.3.1 Определение параметров входящих в математическую модель.....	71
3.3.2 Методы определения технологических и физико-химических параметров перерабатываемого материала.....	74
3.3.3 Методы исследования качества и химического состава перерабатываемого материала и готового продукта.....	76
3.3.4 Методика оценки продуктивного действия и энергетической ценности экструдированных кормовых продуктов.....	78
3.3.5 Методика исследования перевариваемости кормов.....	80
3.3.6 Методика проведения научно-хозяйственного опыта.....	81
3.4 Обработка экспериментальных данных.....	83
Выводы по третьей главе.....	83
<b>4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭКСТРУДИРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ПРОТЕКАНИЯ И КАЧЕСТВО ГОТОВОГО КОРМОВОГО ПРОДУКТА .....</b>	<b>84</b>
4.1 Исследование зависимости структурно-механических и реологических параметров экструдированного материала от параметров технологического процесса.....	84
4.2 Анализ соответствия расчетных данных экспериментальным...	91
4.3 Исследование зависимости технологических и физико-химических параметров от параметров исходного сырья.....	93
4.4 Исследование изменения химического состава перерабатываемого материала в процессе экструзии.....	98
4.5 Определение оптимальных режимов и параметров процесса экструдирования с целью снижения энергоемкости и повышения	

качества готового кормового продукта .....	101
Выводы по четвертой главе.....	109
5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.....	112
5.1 Модернизация одношнекового пресс-экструдера.....	112
5.2 Обоснование разработанной конструкции пресс-экструдера....	116
5.3 Исследование изменения продуктивного действия и энергетической ценности кормов в процессе экструзионной обработки.....	119
5.4 Исследования по оценке перевариваемости экструдированных кормовых продуктов и неэкструдированной зерновой смеси.....	122
5.5 Изучение влияния экструдированных кормовых продуктов на повышение энергетической и питательной ценности рационов и, как следствие, повышение мясной продуктивности скота.....	124
5.6 Определение экономической эффективности.....	129
5.6.1 Определение экономической эффективности от внедрения разработанной конструкции пресс-экструдера.....	129
5.6.2 Определение экономической эффективности применения экструдированных кормов для кормления бычков, выращиваемых на мясо.....	135
Выводы по пятой главе.....	136
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	139
ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ.....	141
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	142
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	164

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Для нормального функционирования организма КРС и обеспечения этих животных необходимой энергией, очень важно вносить в корма зерновые культуры. Среди полезных для КРС зерновых культур можно выделить ячмень, пшеницу и овёс.

Ненадлежащие условия заготовки, а также хранения приводят к плесневению корма и образованию в нем микотоксинов. Для эффективного производства продуктов животноводства необходимо рациональное использование кормов, которое включает в себя методы повышения их биологической и питательной ценности.

Одним из перспективных методов подготовки кормов к скармливанию является экструзия. В процессе экструзионной обработки на перерабатываемый материал оказывается одновременное воздействие давлением и температурой, в результате чего изменяется структура клетчатки корма, происходит декстринизация крахмала до глюкозы, стерилизация корма, инаktivация ингибиторов пищеварительного тракта, улучшаются вкусовые качества.

Для развития крестьянско-фермерских хозяйств является целесообразным создание мини-линий с использованием экструзионного оборудования. Однако современное экструзионное оборудование отличается высокой энерго- и ресурсозатратностью.

Современная тенденция развития экструзионных технологий заключается в обеспечении максимального снижения энергоемкости процессов экструзии при одновременном улучшении качества экструдата.

Приоритетным направлением исследований в области получения высококачественных экструдированных кормовых продуктов и повышения их питательной и биологической ценности является применение пресс-экструдеров, конструкция которых позволяет своевременно изменять параметры воздействия на перерабатываемый материал в зависимости от его структуры.

Таким образом, является целесообразным методологическое обоснование соответствующего математического аппарата и создание энерго- и ресурсосберегающей конструкции пресс-экструдера, которая позволяла бы поддерживать оптимальные режимы экструдирования и оперативно изменять их в зависимости от свойств исходного сырья.

### **Степень разработанности темы.**

Интенсивное изучение процесса экструзии началось за рубежом и бывшем СССР после работ Карлея Д.Ф., Штруба Р.А., Маллока Р.С., Мак-Келви Д.М., Джексона К. В дальнейшем эти исследования получили свое продолжение. На сегодняшний день известно большое количество работ по экструзионным технологиям. Среди трудов, направленных непосредственно на изучение процесса экструдирования кормовых продуктов из материалов растительного происхождения и преобразования перерабатываемого материала в канале шнека пресс-экструдера, представлены работы таких исследователей как Денисов С.В., Юрьев В.П., Соколов А.Я., Насыров А.Ш., Дидык Т.А., Макаров Е.С., Зубкова Т.М., Ханин В.П. и т.д. Однако большинство из них рассматривали перерабатываемый материал как упруго-вязко-пластичное тело, вместе с тем, сырье, поступает в экструдер в сыпучем состоянии. Из чего можно сделать вывод, что процесс преобразования сыпучего материала в упруго-вязко-пластичный недостаточно изучен.

Современные пресс-экструдеры отличаются высокой энергоемкостью, а готовый кормовой продукт не всегда обладает высоким качеством. Снижения энергоемкости процесса экструзии и повышения качества готового кормового продукта можно достигнуть за счет оперативного изменения параметров воздействия на перерабатываемый материал в зависимости от его структуры. В связи с чем, является актуальным совершенствование конструктивных параметров шнека пресс-экструдера, и изучение влияния данных параметров на технологический процесс и качество экструдированного кормового продукта.

**Цель исследования.** Совершенствование конструктивных параметров шнека пресс-экструдера для обеспечения снижения энергозатрат на процесс экструдирования и повышения качества готового продукта.

**Объект исследования.** Процесс экструдирования кормовых продуктов с регулируемым поддержанием давления в шнековой камере, непосредственно в процессе работы.

**Предмет исследования.** Пресс-экструдер с параметрами шнека, изменяющимися непосредственно в процессе работы.

**Методология и методы исследования.** Для обработки экспериментальных данных использовали разработанное программное средство «Обработка результатов многофакторного эксперимента на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ 2<sup>3</sup>», зарегистрированное в фонде алгоритмов и программ Оренбургского государственного университета, а также стандартный набор средств для обработки данных в программе Microsoft Excel.

**Научная новизна.** Разработана математическая модель процесса экструзии, позволяющая учесть изменения реологических свойств перерабатываемого материала в процессе его преобразования от сыпучего до упруго-вязкого. Разработана методика проведения экспериментов с целью создания энерго- и ресурсосберегающих технологий процесса экструдирования кормовых продуктов. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения пресс-экструдера с изменяющимися параметрами шнека для повышения качества готового кормового продукта и снижения энергозатрат на процесс экструдирования. Впервые выявлены закономерности влияния технологических параметров пресс-экструдера и физико-химических свойств сырья на процесс экструдирования и качество готового кормового продукта. Впервые получены оптимальные значения параметров процесса экструдирования кормовых продуктов в экструдерах с изменяющимися параметрами шнека.

**Практическая значимость.** Разработана и введена в эксплуатацию энергосберегающая конструкция шнекового пресс-экструдера с изменяющимися параметрами шнека (патент РФ на изобретение № 2548980). Разработано

устройство для определения динамического коэффициента трения. Разработано программное средство «Критериальная оценка эффективности технологии экструдирования белково-крахмало-клетчаткосодержащего сырья» (свидетельство о регистрации в Фонде алгоритмов и программ Оренбургского государственного университета). Даны практические рекомендации по использованию пресс-экструдера с изменяющимися параметрами шнека, с целью снижения энергоемкости и повышения качества готового кормового продукта. Основные результаты использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

**Вклад автора в проведенные исследования.** Разработана энергосберегающая конструкция шнекового пресс-экструдера с изменяющимися параметрами шнека (патент РФ на изобретение № 2548980). Получены оптимальные значения параметров процесса экструдирования кормовых продуктов в пресс-экструдере с изменяющимися параметрами шнека. Проведены производственные испытания и дано технико-экономическое обоснование внедрения разработанной конструкции пресс-экструдера. Поставлен научно-хозяйственный опыт изучения влияния экструдированного кормового продукта на мясную продуктивность скота. Дана экономическая оценка эффективности применения кормового продукта, экструдированного на разработанной конструкции пресс-экструдера, в кормлении крупного рогатого скота. Разработано программное средство «Критериальная оценка эффективности технологии экструдирования белково-крахмало-клетчаткосодержащего сырья» (свидетельство о регистрации в Фонде алгоритмов и программ Оренбургского государственного университета).

**Внедрение.** Экспериментальная установка пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека использовалась на ЗАО «Оренбургский комбикормовый завод». Результаты исследований и разработанная конструкция шнека пресс-экструдера используются в учебном процессе. Кормовой продукт, производимый на разработанной конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно

в процессе работы параметрами шнека, использовался для кормления крупного рогатого скота в крестьянско-фермерском хозяйстве ООО МТС «Красногоры» село Новочеркасск Оренбургской области, Саракташского района.

**Апробация.** Основные положения и результаты работы докладывались и были одобрены на региональных молодежных инновационных конвентах Оренбургской области (Оренбург, 2012, 2014 гг.); на всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии в АПК; теория и практика» (Пенза, 2013 г.); на III-ей всероссийском конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, 2014 г.); на всероссийских научно-методических конференциях (с международным участием) «Университетский комплекс как региональный центр образования, культуры и науки» (Оренбург, 2013, 2014, 2015 и 2016 г.); на международной научно-практической конференции «Инновации в науке» (Новосибирск, 2015 г.); на международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2015 г.).

Результаты исследований представлялись на областных выставках и конкурсах и отмечены: выставка научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2013» (Оренбург, 2013) – диплом победителя за проект «Современное представление об экструзии крахмало-белково-клетчаткосодержащих материалов и методика получения из них высококачественных экструдированных продуктов» и «НТТМ – 2014» (Оренбург, 2014) – диплом победителя за проект «Энерго- и ресурсосберегающие технологии производства экструзионных продуктов, кормов и кормовых добавок»; областной конкурс «Молодые ученые Оренбуржья – науке XXI века» (Оренбург, 2014) – диплом и премия губернатора оренбургской области для талантливой молодежи за работу «Разработка энерго- и ресурсосберегающей технологии производства экструзионных продуктов на основе параметрического синтеза».

**Положения, выносимые на защиту:**

- теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности применения пресс-экструдера с изменяющимися параметрами шнека для

повышения качества готового кормового продукта и снижения энергозатрат на процесс экструдирования;

- математическая модель процесса экструзии, учитывающая изменения реологических свойств перерабатываемого материала в процессе его перехода от сыпучего до вязко-упругого состояния;

- результаты экспериментальных исследований по изучению влияния технологических параметров пресс-экструдера и физико-химических свойств сырья на процесс экструдирования и качество готового кормового продукта;

- конструкция пресс-экструдера с изменяющимися параметрами шнека, защищенная патентом РФ на изобретение;

- алгоритм разработки энерго- и ресурсосберегающей технологии процесса экструдирования кормовых продуктов.

**Обоснованность и достоверность.** Научные положения, выводы и предложения производству обоснованы и базируются на теоретических и экспериментальных данных, степень достоверности которых подтверждена современными математическими методами обработки результатов исследования. Выводы и предложения основаны на научных исследованиях, проведенных с использованием современных методов анализа и расчета. Основные материалы диссертационной работы доложены на расширенном заседании научных сотрудников и специалистов кафедры «Пищевая биотехнология» ФГБОУ Оренбургский государственный университет (Оренбург, 2016).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 20 работ, из них 7 печатных работ в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, получено три патента РФ на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения с общими выводами и рекомендациями, списка использованных источников из 205 наименований и 38-и приложений. Общий объем диссертации составляет 202 страницы, включая 31 рисунок, 15 таблиц.

# 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

## 1.1 Анализ влияния химического состава кормов на мясную продуктивность сельскохозяйственных животных

Для удовлетворения потребности населения нашей страны в продуктах питания необходимо существенно повысить продуктивность животных и производство их продукции на основе укрепления кормовой базы, разработки новых эффективных систем кормления [1].

При выращивании мясного скота для получения высоких значений среднесуточного прироста, животные нуждаются в рационе с повышенным содержанием протеина и обменной энергии. Рост продуктивности молодняка мясного скота основан на эффективном использовании питательных веществ рационов [2]. Одна из причин высоких затрат корма на единицу производимых продуктов животноводства – недостаток протеина [3].

Н.В. Груздев, В.В. Полежаев, С. Amling и другие ученые, изучая эффективность использования протеина из рационов с различной концентрацией энергии, пришли к выводу, что высокоэнергетические рационы способствовали более эффективному использованию питательных веществ и обладали высокой экономической эффективностью [4].

Недостаток протеина в рационах сельскохозяйственных животных приводит к резкому ограничению их продуктивности, сдерживанию роста и развития молодняка, понижению сопротивляемости заболеваниям. При этом перерасход самих кормов и энергии значительно снижает продуктивность животных и доходность производства, а также удорожает производство продукции. [5].

Биологическая полноценность протеина зависит от его аминокислотного состава. Чем богаче протеин корма по аминокислотному составу, тем он лучше усваивается животными.

Животные для нормального роста и развития обязательно должны получать в кормах рациона так называемые незаменимые аминокислоты – лизин, триптофан, фенилаланин, лейцин и изолейцин, треонин, метионин, валин, аргинин, гистидин, которые организм не может синтезировать или синтезирует в недостаточном количестве. Метионин же, лизин и триптофан считаются также «критическими» (лимитирующими) аминокислотами. В практике хозяйств животные очень часто испытывают в них недостаток, что неблагоприятно отражается на жизнедеятельности организма [6]. Наиболее требовательны к поступлению незаменимых аминокислот молодые растущие животные. Животные испытывают определенную потребность в отдельных аминокислотах, физиологическая роль которых специфична [7].

Изучением кормления мясного скота и исследованием влияния питательных веществ рационов на мясную продуктивность занимались Галлиев Б.Х., Ефремова Л.В., Прибылов В.Д., Герасимова Г.Г., Герасимов Б.Л., Нефедова Н.Н., Невидомская А.Ф., Пирс Я.В., Федоринова М.К., Старых И.Л., Дусаева Х.Б., Кренев А.В., Ильинский А.В., Кребс Г., Корнберг Г., Курилов Н.В., Кошаров А.Н., Кальницкий Б.Д., Материкин А.М., Севастьянова Н.А., Ланина А.В., Левантин Д.Л., Левахин В.И. и другие ученые. Результаты исследований выявили, что сбалансированность рациона по питательным веществам – путь к повышению мясной продуктивности и сохранению здоровья животного [8-17].

Большинству видов сельскохозяйственных животных по энергии, протеину и отдельным минеральным веществам балансируют рационы зерновыми кормами, так как они содержат большое количество легкоперевариваемых питательных веществ. В кормлении молодняка крупного рогатого скота используют в первую очередь: пшеницу, ячмень, овес и кукурузу [7].

Эффективное использование питательных веществ зерновых культур, входящих в корма, заключается в повышении их питательной и биологической ценности за счет правильной заготовки и хранения, а также дополнительной обработки. В этом направлении к наиболее перспективным следует отнести способы, основанные на высокотемпературных режимах обработки. Одним из

таких способов является экструзия. В результате экструзии наблюдается как повышение питательной ценности кормовых продуктов, так и улучшение их физико-механических свойств [5].

Маркелова В.Н., Фомичёв Ю.П. и Никанова Л.А. исследовали химический состав экструдированного зерновых, бобовых и масличных культур и установили, что в процессе экструзии происходит изменение аминокислотного состава. Арсений Н. М. и Шариков А. Ю. отмечали влияние экструзии на сохранность аминокислот и пищевую ценность белка [18-19].

Установлено, что в результате экструдирования увеличивается концентрация сырого протеина, количество лизина – одной из самых дефицитных аминокислот, глицина, цистина, триптофана, метионина и аспарагиновой кислоты. Также происходит уменьшение безазотистых экстрактивных веществ, которые представлены мало усвояемым крахмалом, и увеличение легкодоступных сахаров.

Шевцов Н.Н., Зуев Н.П. и Наумов М.М. изучая влияние экструзионной обработки на зерновую смесь, отметили, что процесс экструдирования положительно повлиял на химический состав и питательность зерна пшеницы и ячменя. Также они установили, что скармливание дойным коровам комбикормов-концентратов с экструдированной пшеницей и ячменем повышало потребление сенажа вико-овсяного и силоса кукурузного [20].

Увеличение доступности питательных веществ зерносмеси в процессе экструзии отмечали такие ученые как Д. Ахметжанов, К. Молдажанов и А. Таджиева. Они установили, что после экструзионной обработки питательная ценность кормов увеличивается практически вдвое, поскольку часть работы желудка животного выполняется экструдером и, соответственно, энергия корма полностью идёт на строение его организма. К аналогичным выводам в своих исследованиях пришли Шмалько Н.А., Беликова А.В. и Росляков Ю.Ф [21]. Зверкова З.Н. установила, что экструдирование зерна озимой ржи полной спелости снижает содержание в нём алкилрезорцинов, ингибиторов трипсина, улучшает доступность переваривающих агентов организма животных к

питательным веществам корма, повышает содержание сахара - на 0,9 %, уменьшает долю крахмала на 4,1% в сравнении с дроблёным зерном ржи. Введение экструдированного зерна озимой ржи взамен ячменной дерти в концентратную часть рациона ремонтных тёлочек, обеспечивает среднесуточный прирост живой массы на уровне 906-908 г и является экономически целесообразным [22].

Трутнев М.А. отмечал, что после экструзии озимой ржи, в ней снижается количество клетчатки, объясняя это тем, что экструзионная переработка незначительно её разрушила, переведя составную часть - целлюлозу в сахар. Трутнев М.А. и Гайдай И.И. в своих исследованиях установили, что при скармливании экструдированного корма бычкам, у них повышается коэффициент перевариваемости [23].

Бадмаев Н. А. и Арилов А. Н. установили, что кормление баранчиков экструдированной зерновой смесью положительно влияет на их мясную продуктивность [24,25].

Как показал проведенный анализ литературных источников в процессе экструзионной обработки происходят не только структурно - механические преобразования, но и значительные изменения химического состава обрабатываемого материала. Рациональная технология производства экструдированных кормовых продуктов должна обеспечивать сохранность полезных свойств сырья на каждом этапе его переработки. Таким образом, является целесообразным изучение изменения физико-механических свойств и химического состава перерабатываемого материала в процессе экструзии.

## **1.2 Анализ существующего оборудования для производства экструдированных кормовых продуктов**

Экструзионная обработка впервые была применена при производстве бесшовных труб в Англии в 1797 году, после чего данный метод получил широкое распространение, позволив изготовить трубы с применением давления и

кольцевых насадок, [26]. Вскоре были изготовлены и другие изделия по этому же принципу: искусственные волокна, кабельные изделия, пленки, кирпич, мыло, и т.д.

В настоящее время экструдеры широко применяются в производстве кормов и кормовых добавок, в частности для обработки зернового сырья (пшеница, ячмень, кукуруза, горох, рожь, бобы, соя и т.д.). Широкое распространение обработки материалов растительного происхождения методом экструзии можно объяснить тем, что экструдеры могут совмещать в себе ряд операций, выполняя их быстро и непрерывно (составлять композиции из нескольких компонентов, перемешивать, сжимать, нагревать, варить, стерилизовать, формовать практически одновременно) [27].

По конструкции пресс-экструдеры можно разделить на типы, отличающиеся по: режимам работы, способам экструдирования, количеству рабочих органов, параметрам основного рабочего органа, форме выходного сечения, виду получаемого продукта [28]. На рисунке 1.1 представлена классификация пресс-экструдеров, предложенная С.В. Денисовым [29].

Вместе с тем, для всех вышеперечисленных пресс-экструдеров общими являются такие характерные признаки, как [30, 31-33]:

1. Наличие корпуса с загрузочным устройством и формующим инструментом, а также одного или нескольких рабочих органов.

2. Происходящие в пресс-экструдере процессы: смешивание, перемещение перерабатываемого материала вдоль канала шнека, разогрев за счет трения перерабатываемого материала о рабочие органы или внешнего подвода тепла, пластификация или расплавление, гомогенизация и формование готового продукта.

3. Возможность перерабатывать на пресс-экструдере сырье, весьма различающееся по реологическим и физико-механическим свойствам.

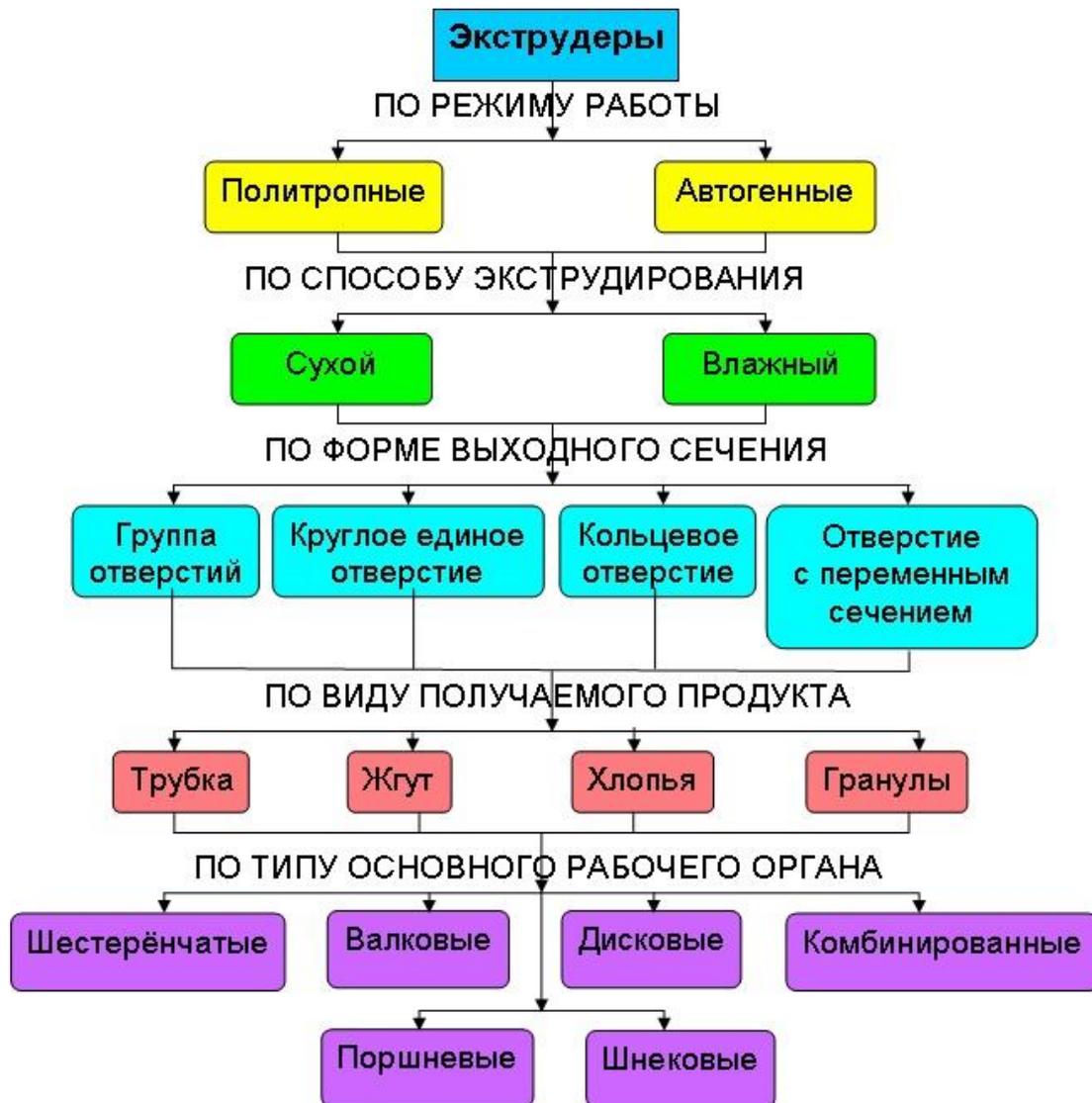


Рисунок 1.1 – Классификация пресс-экструдеров

По режиму работы шнековые пресс-экструдеры делят на две группы, отличающиеся термодинамическими особенностями [29,34]: автогенные и политропные.

Автогенные - тепловая энергия, которая необходима для протекания процесса экструдирования, при таком режиме образуется только за счет сил трения.

Политропные - для разогрева до необходимой температуры и возможности её регулирования применяют дополнительный внешний подвод тепла, что позволяет быстро выйти на рабочий режим и стабилизировать его [29,35].

При экструзионной обработке зернового сырья для получения экструдированных кормовых продуктов рекомендуется применять автогенные режимы [36,37].

На сегодняшний день существует множество пресс-экструдеров, отличающихся техническими характеристиками. Анализ рынка производителей экструзионной техники, представленный странами как Европы, так и Азии, показал, что наибольшее распространение среди экструзионного оборудования, применяемого для производства кормовых продуктов получили шнековые пресс-экструдеры. Следует также отметить, что большинство современных пресс-экструдеров имеют автоматизированное управление.

Для развития крестьянско-фермерских хозяйств является целесообразным создание мини-линий с применением экструзионного оборудования, однако современные экструдеры отличаются большими габаритами и высокими энергозатратами на производство единицы продукции (100-300 кВт·ч/т), поэтому разработка эффективного малогабаритного пресс-экструдера для производства экструдированных кормовых продуктов является перспективным направлением.

В результате проведенного анализа фирм, выпускающих экструзионное оборудование для производства кормовых продуктов, видно, что в свете модернизации экономики, провозглашенной правительством и президентом России, необходимо более активно продвигать на рынок отечественного производителя, выпускающего экструдеры, разработанные на основе собственной технологии, так как данный сегмент рынка занят в основном иностранными фирмами, а в данной сфере существует много российских разработок, которые требуют внедрение в производство [38-40].

### **1.3 Анализ конструктивных особенностей шнеков пресс-экструдеров**

Одним из основных рабочих органов во всех шнековых пресс-экструдерах является шнек, функция которого забирать загружаемый материал от

загрузочного устройства, транспортировать его, перемешивать, сжимать, пластифицировать и экструдировать в виде однородной массы [41].

На рисунке 1.2 представлена классификация шнековых пресс-экструдеров, разработанная автором на основании классификаций, приведенных в работах С.В. Денисова, Т.А. Дидык, В.П. Ханина [29,42,43].



Рисунок 1.2 – Классификация шнековых пресс-экструдеров

Шнековые пресс-экструдеры на сегодняшний день весьма разнообразны и отличаются друг от друга, как конструкцией в целом, так и конструктивными параметрами шнеков: длиной, разделением на зоны, числом заходов, шагом

винтовой линии, глубиной и профилем нарезки, формой конца шнека, материалом из которого изготавливается шнек [29,44].

Широкое применение в промышленности получили шнековые пресс-экструдеры [45,46], которые выпускаются с одним или двумя шнеками. Однако наибольшее предпочтение при производстве экструдированных кормовых продуктов отдается одношнековым пресс-экструдерам [32,33,47-50].

Основными элементами одношнекового прессующего механизма является шнековая камера, состоящая из шнека и шнекового корпуса, а так же матрица с формующими каналами и загрузочное устройство [51-53].

Шнековую камеру чаще всего делят на две – три зоны: 1 – зона загрузки; 2 – зона пластификации (плавления); 3 – дозирующая зона (рисунок 1.3).

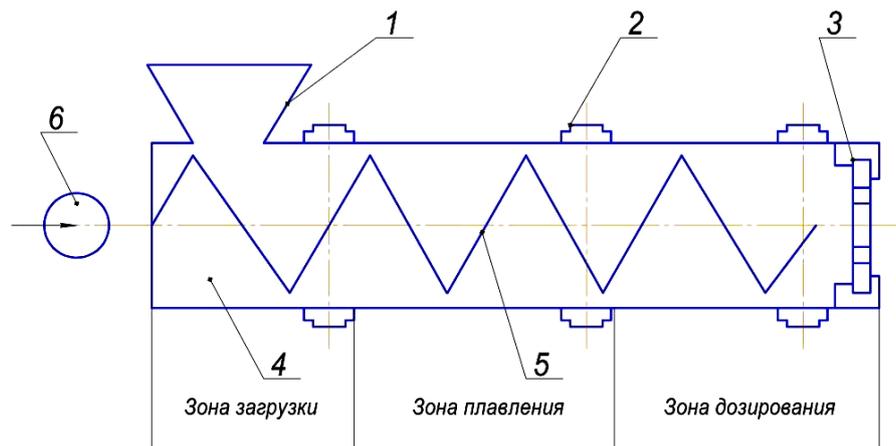


Рисунок 1.3 – Зоны шнековой камеры пресс-экструдера: 1 – загрузочное устройство; 2 - фланцевые соединения; 3 – формующая головка; 4 – корпус пресса; 5 – шнек; 6 - привод прессующего шнека

При этом зону пластификации можно разделить на сегменты транспортирования и сжатия, а зону дозирования – на сегменты гомогенизации и формования [54-57]. Это разделение обусловлено тем, что на разных участках шнека происходят весьма различные преобразования в перерабатываемом материале. Однако эти зоны не являются разграниченными элементами, так как представляют единый путь для движущегося материала от загрузочного устройства до выхода из формующего отверстия.

По форме корпуса шнековые пресс-экструдеры бывают цилиндрические либо конические. Как правило, форма шнека должна повторять форму шнекового корпуса [53,58]. У пресс-экструдеров конической формы сужение диаметра шнекового корпуса по направлению к формующему отверстию позволяет увеличить заполнение прессующего механизма перерабатываемым материалом, а также повысить давление прессования. Однако в практике преимущественное распространение получили шнековые корпуса цилиндрической формы, так как они проще в изготовлении и эксплуатации (рисунок 1.4).

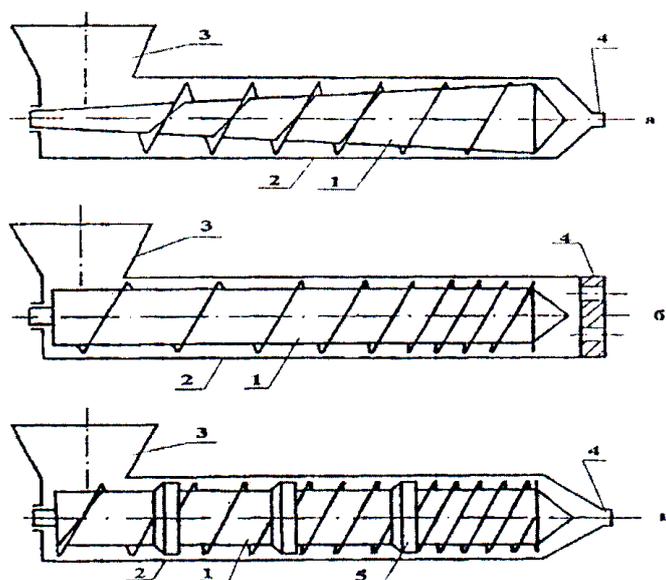


Рисунок 1.4 - Структурные схемы одношнековых прессующих механизмов: а – шнек с одной лопастью постоянного шага и переменной высотой лопасти; б – шнек с лопастью переменного шага и постоянной высотой лопасти; в – шнек, разделенный на секции компрессионными затворами, с переменным шагом лопасти и переменным числом лопастей в секциях; 1 – шнек; 2 – шнековый цилиндр; 3 – загрузочное устройство; 4 – формующая матрица; 5 – компрессионный затвор

Шнековые корпуса, у которых длина более 500 мм, изготавливают, как правило, составные, то есть собирают из отдельных секций (модулей), стыковкой друг к другу вдоль продольной оси. Такие конструкции корпусов позволяют при изменении рабочей длины шнека менять технологическую длину перемещения и

соответственно время пребывания экструдированного материала в пресс-экструдере [33,53].

По линии разъема модулей существуют варианты исполнения как поперёк, так и вдоль продольной оси корпуса шнека, что упрощает очистку пресс-экструдера и позволяет контролировать состояние поверхности рабочего органа. В качестве примера составного цилиндрического корпуса может служить пресс-экструдер для производства карбамидного концентрата КМЗ. В нем совмещены оба эти конструктивные решения: каждый участок шнекового корпуса выполнен из двух половин, при этом все детали скреплены хомутами [33].

В целях обеспечения технологичности изготовления шнека, его шаг и высота лопасти должны оставаться постоянными по всей длине. Однако для повышения развиваемого давления при прессовании и снижения противотока перерабатываемого материала, шаг шнека на выходном участке выполняют уменьшающимся. Снизить противоток между винтовыми лопастями шнека можно также уменьшением высоты лопасти. Зачастую на практике применяются оба конструктивных решения.

Если при определенной технологии экструдирования требуется шнек более сложной формы, например, с разным шагом, диаметром или высотой лопасти, его изготавливают составным из модулей с переменным шагом и глубиной канала [58,59].

Для обеспечения технологичности шнека, каждый его модуль выполняется с постоянными геометрическими параметрами. Это позволяет собирать шнеки, предназначенные для выполнения конкретной технологической задачи, различных профилей. В модульном варианте отдельные модули собираются на общем стержне (валу), фиксируясь призматическими шпонками или шлицевыми соединениями (радиальная фиксация с аксиально-винтовым креплением на конце вала) [60-62].

Геометрические параметры шнеков являются особенностью пресс-экструдеров. В зависимости от реологических, структурно-механических и

физико-химических свойств перерабатываемого материала и требуемого качества готового экструдата выбирается конфигурация шнека в целом [63-65].

Шнековые модули по выполняемым ими функциям делятся на: транспортирующие, разогревающие, смешивающие [66].

Модули транспортирующего типа в одношнековых пресс-экструдерах имеют трапецидальный профиль нарезки винтовой линии. В двухшнековых пресс-экструдерах транспортирующие модули могут иметь профиль как трапецидальный, так и шариковый (рисунок 1.5). Зачастую такие модули применяются в зоне загрузки, но могут использоваться и в других зонах.

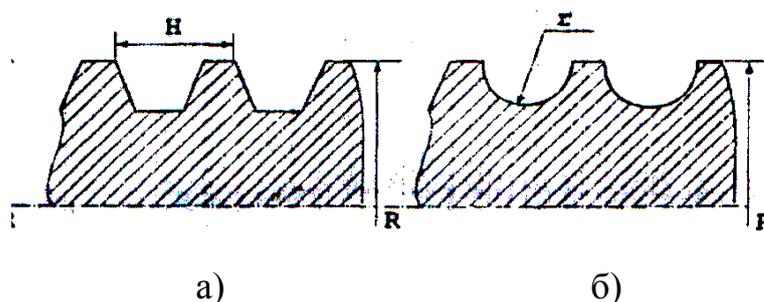


Рисунок 1.5 – Профили шнеков: а) – винтовая канавка в форме трапеции; б) – винтовая канавка в форме полуокружности

При переработке сырья с повышенным содержанием влаги, от 25 % и более, возникает необходимость её удаления (обеспечения процесса разряжения). В таких случаях после зоны плавления, применяют геометрию профиля шнека, предусматривающую участок с увеличивающимся по отношению к диаметру шагом. [67,42].

В модулях смешивающего типа для смешивания различных компонентов сырья предусматриваются специальные элементы: месильные, разминающие, гомогенизирующие. Эти элементы позволяют улучшить перемешивающий эффект, а также с помощью них можно изменять время пребывания обрабатываемого материала в шнековой камере. Когда месильные элементы отсутствуют, процесс смешивания протекает постепенно на всем протяжении движения обрабатываемой массы, но с меньшей интенсивностью [68-70].

Установлено, что энергия, расходуемая на процесс экструдирования в частности кормовых продуктов, расходуется на сжатие и раздавливание продукта, его перемещение и преодоление возникающих сил трения. Мощность, расходуемая на сжатие материала в винтовом канале, составляет 30-40% от полной затрачиваемой мощности. Закономерности изменения потребляемой мощности от степени сжатия перерабатываемого материала изменяются по нелинейной зависимости. Чем выше степень сжатия перерабатываемого материала, тем больше потребляемая мощность на приводе пресс-экструдера [71,72].

При вращении шнека движущаяся поверхность витков, вступая в соприкосновение с частицами материала, оказывает на них давление, которое передается к соседним частицам, не находящимся в данный момент в непосредственном соприкосновении с витками [68].

При этом наблюдается значительное трение частиц по рабочим поверхностям, трение частиц друг о друга и внутреннее трение в частицах, связанное с их пластическими деформациями. В перерабатываемом материале возникает высокое полное напряжение (создаваемое суммой нормальных и касательных напряжений), пласты материала начинают наезжать друг на друга, образуя в перерабатываемом материале поры. Это приводит к большому расходу энергии при работе шнекового пресса и снижению плотности перерабатываемого материала [73,74].

При проведении экструзионной обработки является важным обеспечение условий как можно более низкого полного напряжения в перерабатываемом материале в зонах плавления и дозирования с целью предотвращения механического разрушения материала и снижения энергоемкости процесса экструзии. А также одновременно создания как можно более высокой плотности, с целью получения готового продукта на выходе из экструдера более плотной и прочной структуры, обеспечивающей требуемое качество экструдированного кормового продукта [75,76].

Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что технологический процесс экструдирования и его энергоемкость в основном определяются конструкцией шнека.

В настоящее время в одношнековых экструдерах применяются в основном шнеки с винтовой нарезкой по всей длине, а также постоянным шагом, равным наружному диаметру шнека. Недостатком при этом является отсутствие возможности оперативного изменения параметров шнека (отсутствие возможности изменения шага и угла наклона витков шнека) в зоне загрузки непосредственно в процессе работы, а следовательно, отсутствие возможности регулирования скорости подачи материала в зону плавления в зависимости от вида перерабатываемого материала, что приводит к недостаточному или наоборот избыточному уплотнению материала в зоне загрузки и как следствие, снижению качества получаемой продукции и повышению энергоемкости экструдера [77,78].

Проведенный анализ существующих конструкций пресс-экструдеров для производства экструдированных кормовых продуктов позволяет сделать вывод о том, что необходимо разработать конструкцию шнека с возможностью оперативного изменения его параметров: угла наклона и шага винтовой лопасти шнека непосредственно в процессе работы, что позволит снизить энергоемкость процесса экструдирования и повысить качество производимой продукции.

#### **1.4 Анализ химических и структурно-механических преобразований в экструдированном материале**

Отличительной особенностью обработки материалов методом экструзии наряду с традиционной влаготермической обработкой, является протекание процесса при высокой температуре, давлении, напряжениях сдвига, при невысокой влажности сырья и в течение короткого промежутка времени. Такой метод обработки дает возможность количественно и качественно изменять структуру и состав экструдированных продуктов [29,79,80].

Основными компонентами сырья, из которого производят кормовые продукты, являются белки, крахмалы и клетчатка [37].

В ходе экструзии обрабатываемый материал проходит целый ряд фазовых превращений: из твердого сыпучего состояния в пластичное, а затем в вязко-текучее [81-83].

В зависимости от глубины происходящих в обрабатываемом материале преобразований, экструзию делят на три вида: холодную, теплую и горячую. Наиболее распространенным является холодный вид экструзии. Однако в последнее время интенсивно развиваются методы теплой и горячей экструзионной обработки [84,85].

В процессе холодной экструзии в обрабатываемом материале, из-за медленного его перемещения под давлением, наблюдаются только структурно-механические преобразования и формование экструдата с образованием заданных форм. Обрабатываемый материал при этом обладает высокой пластичностью, а также низкой вязкостью. Влажность сырья при холодной экструзии составляет от 30 до 60%. Температура перерабатываемого материала незначительно влияет на его свойства и в зоне формования находится в пределах от 20 до 60 °С, а давление составляет до 6 МПа. При этом наблюдаются структурно-механические преобразования перерабатываемого материала с переходом его из сыпучего состояния в упруго-вязко-пластичное [86-88]. В основном метод холодной экструзии используется при производстве макаронных и кондитерских изделий [89-92].

В процессе теплой или варочной экструзионной обработки влажность исходного сырья составляет 20...30%, температура в зоне формования – от 70 до 110 °С, давление также увеличивается до 8...14 МПа. Повышение давления и температуры приводит как к структурно-механическим, так и химическим изменениям обрабатываемого материала. В результате теплой и горячей экструзионной обработки крахмалосодержащего сырья, происходит желатинизация крахмала, но при этом не происходит значительного увеличения объема экструдата и образования пористой структуры на выходе из экструдера.

Экструдированный продукт имеет небольшую плотность, незначительное увеличение в объеме, обладает пластичностью и ячеистым строением. В некоторых случаях экструдату требуется последующая обработка подсушиванием, обжариванием или фритированием [77,84,93].

Влажность экструдированного материала при горячей экструзии составляет 10...20%. Температура в зоне формования находится в пределах от 110 до 200 °С, давление – 12...25 МПа. Из-за резкого падения давления на выходе из экструдера происходит интенсивное испарение влаги из экструдированного продукта, что приводит к значительному увеличению его объемов и образованию пористой структуры. Под воздействием высоких температур и давления в перерабатываемом материале происходит разрыв белковых цепей и крахмальных зерен, глубокая декстринизация крахмала и образование пористой структуры, которая фиксируется затвердевшим при резком остывании крахмалом [73].

В процессе холодной экструзии часто прибегают к принудительному охлаждению, а при теплой или горячей – принудительному подводу тепла к обрабатываемому материалу извне [52,79].

Одношнековые экструдеры, применяемые при производстве экструдированных кормовых продуктов, в большинстве являются пластицирующими, то есть исходный материал загружается в экструдер в виде твердых частиц [87,88,94]. Шнек витками увлекает поступающий в загрузочное отверстие непластифицированный материал и затем транспортирует частицы вдоль шнековой камеры. При этом происходит их разогрев за счет сил внутреннего трения, вызванных большими деформациями сдвига. Далее частицы равномерно подаются в виде гомогенного расплава к формирующей матрице. [95,96]. Одновременно с пластификацией происходит процесс смешивания перерабатываемого материала и образования давления [97,98].

Обрабатываемый материал попадает в загрузочное устройство и зону загрузки в сыпучем состоянии. По мере того, как материал продвигается вдоль канала шнека, происходит его уплотнение и разогрев до температуры от 60 до 80 °С, вследствие работы сил трения. При таких значениях температуры и влажности

до 30 %, происходит пластификация белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья и его переход из сыпучего состояния в упруго-пластичное [99,100].

В процессе горячего экструдирования после зоны пластификации следует зона плавления. В этой зоне происходит расплав материала и его переход в вязко-текучее состояние, так как за счет деформации температура достигает от 120 до 190 °С. В результате воздействия высоких температур, значительных механических усилий (сжатия и сдвига), разрушается полимерная структура основных компонентов белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья: денатурация белков и желатинизация крахмалов. Области биополимеров, которые способны к кристаллизации (такие как амилоза и амилопектин в составе крахмала) при этом плавятся, а аморфные – переходят из неупорядоченного упруго-пластичного состояния в вязко-текучее [79,97,98].

В дозирующей зоне происходит завершение преобразования белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья в состояние вязко-текучего. Температура обрабатываемого материала в начале зоны дозирования практически соответствует температуре плавления. При движении материала в данной зоне, он продолжает разогреваться за счет интенсивных деформаций сдвига, и температура доходит до температуры экструзии. В это же время происходит гомогенизация расплава, окончательно расплавляются мелкие, не расплавившиеся в зоне плавления включения и выравнивается температурное поле [99,101-104].

Из всех перечисленных параметров наиболее важным является расплав белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья, то есть преобразование в процессе экструзии в вязко-текучее состояние [99]. Переход белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья в вязко-текучее состояние определяет возможность проведения самого процесса и носит название «термопластическая экструзия» [105]. Установлено, что в процессе прессования продолжается денатурация белковых веществ и прессуемый материал приобретает новое строение [33].

В последнее время процесс обработки белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья на пресс-экструдерах все чаще сопоставляют с процессом обработки полимерных материалов [106,107] в химических реакторах

[108]. Особенность обработки белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья в пресс-экструдере – проведение процесса при высоких температурах и давлении, больших деформациях, активном перемешивании полисахаридов [109-111]. Сильное разрушение структуры частиц прессуемого материала связано с самим характером работы шнекового механизма – разрушение и истирание перемещающихся частиц при их трении по рабочим поверхностям и друг по другу, и действием высокого давления – раздавливание материала.

Анализом влияния температуры и давления на степень уплотнения перерабатываемого материала занимались Коротков В.Г., Попов В.П. и др. [65,112,113]. Было установлено, что с увеличением температуры происходит увеличение степени уплотнения в шнековой камере и увеличивается давление на выходе из экструдера. В результате увеличения давления и степени уплотнения происходят более глубокие химические преобразования в экструдированном материале. Отсюда следует, что степень уплотнения перерабатываемого материала имеет непосредственную взаимосвязь с температурой и давлением, и, как следствие, влияет на глубину химических преобразований в перерабатываемом материале [64,114].

Функциональные свойства готовых экструдированных кормовых продуктов определяются как параметрами перерабатываемого материала, так и параметрами технологического процесса. Анализ физико-химических процессов, происходящих при экструзии белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья показывает, что такие рекомендуемые величины параметров, как влажность, температура перерабатываемого материала, можно непосредственно перенести с лабораторного на промышленный экструдер. Однако, при переносе таких рекомендуемых величин, как диаметры фильер, частота вращения шнека и степень сжатия, возникают определенные сложности, так как это влечет за собой значительные изменения параметров процесса. Эти зависимости достаточно сложные, и изучение влияния каждого из параметров на функциональные свойства готового продукта является достаточно трудоемким [115-121]. В связи с этим возникает необходимость математического моделирования процесса

экструзии, и проведение экспериментальных исследований для установления зависимости параметров экструдруемого материала от параметров технологического процесса, в частности от конструктивных особенностей шнека разрабатываемого пресс-экструдера.

### **1.5 Анализ существующих математических моделей и методологий описания экструзионных процессов**

Разработкой математических моделей процесса экструдирования интенсивно начали заниматься в бывшем СССР и за рубежом после работ таких ученых как Джексон К., Карлей Д.Ф., Мак-Келви Д.М., Штруб Р.А., Маллок Р.С.[117,118].

В дальнейшем теоретические исследования экструзии продолжились в работах Н. Potente [26], В.И. Янкова [46], О.И. Скульского [94], J. Martin [106], В. Elbirly , J.T. Lindt [119], В.А. Силина, В.В. Скачкова [120], и др.

Изучением работы одношнековых пресс-экструдеров занимались Г.К. Берман [69], J.P. Melcion, P. Colonna [121], J.L. Rossen, R.C. Miller [122], Н.И. Назаров [123], Ю.А. Мачихин, И.Э. Груздев [124], Б.М. Азаров [125], А.В. Горбатов [126], В.П. Юрьев , А.Н. Богатырев [127] и другие [78,79,128-130].

Математические модели, описывающие одношнековую экструзионную обработку [131] делят на три группы: реологические, гидродинамические и геометрические [132].

К математическим моделям, входящим в группу гидродинамических, относят модели, разработанные такими учеными, как Г. Шенкель [133], Э. Бернхардт [67], Д.М. Мак-Келви [50] и др. Ими получены уравнения, описывающие течение ньютоновской жидкости в межвинтовом канале. По этим уравнениям можно рассчитать производительность зоны дозирования пресс-экструдера. Однако полученная математическая модель имеет свои недостатки: не учитывает конвективный теплообмен, нет оценки качества готового экструдированного продукта. Таким образом, ньютоновское течение жидкости, которое было принято

исследователя, является решением задач, характерных только для одномерных изотермических течений.

В. А. Силин предложил иной путь решения задачи математического моделирования экструзионного процесса. Им была предложена модель, основанная на геометрическом подходе:

$$P = \left( \pi(D^2 - d_D^2)(H - e) \frac{60n\gamma}{4} \right) \eta_D \left( 1 - \frac{P_\Gamma}{P_{\max}} \right), \quad (1.1)$$

где  $P$  - производительность пресс-экструдера в дозирующей зоне, кг/ч;

$D$  - диаметр винтовой лопасти шнека, м;

$d_D$  - диаметр сердечника шнека в дозирующей зоне, м;

$H$  - шаг витков шнека, м;

$e$  - осевая ширина винтовой лопасти шнека, м;

$n$  - угловая скорость вращения шнека, об/мин;

$\gamma$  — плотность расплава, которая зависит от давления и температуры, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta_D$  — коэффициент осевого перемещения расплава вдоль канала шнека дозирующей зоны;

$P_\Gamma$  — давление, создаваемое экструзионной головкой, Па;

$P_{\max}$  — максимальное давление, которое создаётся всей винтовой линией шнека, при условии, что головка закрыта, Па.

Данная модель основана на теории транспортирующих шнеков - движение обрабатываемого материала в межвинтовом пространстве шнека представляет собой передачу некоторого объема витком шнека за один оборот. Давление вдоль канала шнека распределяется только в зависимости от параметров самого шнека, т.е. в данном случае влиянием реологических характеристик обрабатываемого материала на профиль давления пренебрегают. Применение такой математической модели возможно для обрабатываемого материала, который носит ньютоновский характер течения, т.е. для упрощенного расчета процесса [68].

Для наиболее реального описания физических процессов, происходящих в шнековой камере пресс-экструдера при производстве кормовых продуктов, следует применять реологические модели. Движение обрабатываемого материала

в дозирующей зоне следует рассматривать как неизотермическое течение аномально вязкой жидкости в трехмерном пространстве.

При описании поведения обрабатываемого материала в канале шнека при экструдировании кормовых продуктов, возникает некоторая сложность, заключающаяся в изменении свойств материала в процессе прессования. Это происходит вследствие взаимодействия прессуемого материала с рабочими органами. Однако в некоторых случаях данные изменения могут быть созданы целенаправленно, например, добавлением в конструкцию пресс-экструдера различных компрессионных затворов или насадок.

Рассмотрением реологических моделей материалов, подвергнутых экструзионной обработке, занимались П.А. Ребиндер [134], М. Рейнер, У.Л. Уилкинсон [135], Д. Маруччи [136], Д.М. Мак-Келви [137], С. Мидлман, Р.Д. Степанов, Р.В. Торнер [138], П.М. Огибалов [139], Г.В. Виноградов и Л.Я. Малкин, Д.Х. Чанг [105]. Но эти классические работы в основном относятся к области реологии пластмасс.

Процесс плавления в одношнековых экструдерах впервые был описан Маддоком. Маддок описывал плавление полимеров, и этот тип плавления относился к модели плавления непрерывного слоя твердой фазы.

Несколько позже исследование процесса плавления полимеров в одношнековых экструдерах проводил Тадмор. Им был выполнен теоретический анализ процесса пластикации и разработана классическая модель плавления Тадмора [140]. Тадмор принимал толщину расплавленного слоя за постоянную величину. Однако ясно, что эта толщина должна увеличиваться в поперечном направлении, чтобы могло разместиться возрастающее количество расплава. Шапиро [141] и Вермелен [142,143] детально проанализировали этот вопрос. Они показали, что в самосогласованной модели толщина расплавленного слоя должна изменяться с расстоянием в направлении поперечной оси.

Более реальные предсказания относительно процесса плавления могут быть получены, если расплав полимера рассматривать как неньютоновскую жидкость, текущую в неизотермическом режиме [74,144]. Однако такое расширение анализа

приводит к необходимости совместного рассмотрения уравнения сохранения энергии и импульса. Решение этих уравнений может быть получено только численными методами, так что аналитическое решение невозможно. Один из подходов к разрешению этой проблемы, предложенный Тадмором [145], заключается в том, что в слое расплава принимается определенный температурный профиль, и затем решаются соответствующие уравнения. Если принимается линейный профиль температур в слое расплава, основное уравнение записывается следующим образом:

$$\tau_{xy} = m_r a_T \left( \frac{dv_x}{dy} \right)^n, \quad (1.2)$$

где  $a_T = \exp[\alpha_T(T_m - T)]$

В работе Раувендаала [146] предложена теория плавления неньютоновских жидкостей, свойства которых зависят от температуры. Модель представляет собой развитие и обобщение предыдущих теорий плавления и позволяет оценить влияние температурной зависимости вязкости расплава на процесс плавления.

Уравнение для расплава полимера выражается следующим образом:

$$\tau_{xy} = m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy}, \quad (1.3)$$

где  $m = m_0 \exp[\alpha(T_0 - T)]$

Эдмондсон и Феннер [147-150] предложили модель плавления, в которой предполагалось, что твердый слой подвергается ограниченной деформации. Однако анализ Эдмондсона и Феннера содержал ряд противоречий, на которые указал в своей работе Мейджер [151]. Донован [152] развил математическую модель Тадмора посредством устранения допущения постоянной скорости твердого слоя и включения постепенного нагревания твердого слоя в зоне плавления. Как упоминалось ранее, Шапиро [141] и Вермулен [142,143] при анализе процесса плавления учитывали увеличение толщины слоя расплава с ростом поперечного размера канала. Шапиро, Пирсон с сотрудниками усовершенствовали теоретический анализ Тадмора [141,153-155]. Модель, представленная Шапиро, Пирсона с сотрудниками, состоит из 5 зон. Такая модель

процесса плавления представляется наиболее реальной, но, к сожалению, существенно усложняет расчеты.

Хинрикс и Лиллет [156] при построении модели плавления учитывали влияние зазора между выступом нарезки цилиндром на скорость плавления. Для учета кривизны канала они использовали спиральную систему координат. Сандстром и Янг [157] проанализировали влияние конвективного переноса плавления. При этом они обнаружили, что этот фактор приводит к увеличению скорости плавления на 20% по сравнению с теоретическими предсказаниями, учитывающими только кондуктивный перенос тепла. Сандстром и Ло [158] исследовали размягчение аморфных полимеров. В работах Чанга [159,160] представлен анализ влияния конечной толщины твердого слоя, изменения плотности и скорости твердого слоя на протяженность зоны плавления. Кроме того, Чанг разработал специальную модель шнека, чтобы изучить характер плавления полимеров.

Интересный подход к анализу плавления в одношнековых экструдерах был предпринят Вирьяютхакороном и Кассаханом [143]. Они разработали новую программу для математического анализа пластицирующей экструзии, основанную на методе конечных элементов, которая позволила моделировать трехмерное течение с фазовым переходом. Модель плавления фактически предсказывается из расчетов, что более ранние работы не были в состоянии сделать. Недостаток состоит в необходимости использования мощной вычислительной техники, практически недоступной для большинства инженеров-технологов [161,162].

Чанг с сотрудниками получили простые аналитические выражения для предсказания характера плавления полимеров [163] в шнековых экструдерах. Они получили формулы, справедливые для неньютоновских жидкостей, вязкость которых зависит от температуры, используя метод решения, аналогичный методу Пирсона.

В модели Чанга скорость плавления на единицу площади представляется следующим образом:

$$\frac{dM_p}{dA} = M_p^0 \rho_m \Delta v, \quad (1.4)$$

где  $M_p^0$  - безразмерная величина эффективности плавления, которая характеризует интенсивность плавления, отнесенную к площади зоны плавления и единице площади скольжения.

Реологические модели материалов животного и растительного происхождения и их особенности рассматривали в своих работах Н.Б. Урьев, М.А. Талейник [164], Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихина и А.В. Горбатов [165]. Анализируя эти модели можно сказать, что свойства экструдированных материалов описывались первоначально моделью ньютоновской жидкости [137,166]. Однако в дальнейшем большинством исследователей [138] использовалась модель псевдопластического тела, описываемая уравнением Оствальда-де Виля.

Виноградов Г.В. и его сотрудники, представляющие вязкостные свойства как температурно-инвариантные, получили другой вид уравнения, отличающийся от уравнения Оствальда-де Виля. Этот вид степенного уравнения был использован П.Н. Малышевым при исследовании шнекового пресса-экструдера [166,167]. Наиболее широкое распространение получило уравнение Френкеля-Эйринга, которое описывает изменение вязкости от температуры [168].

Е. Спандиаровым [169] в своих исследованиях была использована модель упруго-вязко-пластичного тела, которое линейно по отношению к скорости сдвига. Им были определены компрессионные, прочностные, а также релаксационные свойства комбикормов и их ползучесть. А.К. Атыхановым определены вязкостные свойства кормовой смеси при экструзионной обработке, А.И. Вешкиным – реологические свойства крахмала [69,170].

Ю.А. Мачихин и С.А. Мачихин указывали на возможность использовать основные реологические уравнения, отличные от псевдопластических тел, например, Гершеля-Балкли или Бингама.

На большом количестве комбикормов с различным составом И.А. Бондаревой [171] экспериментально определены параметры пластичного тела,

которые зависят не только от рецептуры экструдированного материала, но и от его температуры и влажности, а также от давления, создаваемого в канале шнека.

С.А. Бостанджиян и А.М. Столин [172] предложили рассматривать движение материала в канале шнека при теплом режиме, как с проскальзыванием, так и без него. Т.М. Зубкова [173] подтвердила данные предположения и установила, что касательные напряжения внутри канала шнека при теплой экструзии не меняют своего направления. Причем вместе с тем, возникает проскальзывание материала по шнеку. Также Т.М. Зубковой были выведены формулы для расчета импульса касательных и нормальных напряжений, которые воздействуют на обрабатываемый материал в процессе прессования.

Модель, разработанная Т.М. Зубковой, была дополнена эмпирической зависимостью температуры обрабатываемого материала от параметров эффекта и конструктивных параметров шнека, которую предложил В.П. Ханина [43]. Им также был выполнен параметрический синтез параметров и режимов теплой экструзионной обработки для пресс-экструдера ПЭШ-60/4. Проскальзывание В.П. Ханин объяснял нагревом околостенного материала шнека до температуры выше, чем экструдированный материал.

Для описания поведения в канале шнека сырья, из которого производят кормовые продукты, используется механика прессуемого сыпучего тела, так как сырье попадает в зону загрузки в рассыпном виде. Поведение сыпучего тела в транспортирующей зоне шнековой камеры рассмотрено А.М. Григорьевым [134], при прессовании – С.С. Вяловым [174], Г.М. Ждановичем [175], М.Ю. Бальшиным.

Модель сыпучих тел для описания поведения материала, прессуемого шнеком, была использована Г. Шенкелем [176], В.А. Силиным [177], Е.С. Макаровым [178], И.Э. Груздевым и другими исследователями.

Также при описании поведения прессуемого шнеком материала следует отметить попытки, в основе которых лежит модель пластичного тела или «пластической гайки», предложенная М.Н. Караваевым. Такая модель использовалась Г.К. Берманом, Ю.А. Мачихиным и Н.Н. Луниным [179] при

описании вязкопластичной массы, движущейся в предматричной камере пресс-экструдера [139] и в коническом канале матрицы [180].

Модель пластичного тела с параметрами, зависящими от всестороннего давления, для описания экструдирования комбикорма влажностью до 18 % использовал В.Ю. Полищук. Ту же модель, но при влажности от 24 до 32 % использовала Т.М. Зубкова [172], а И.А. Бондаревой [67] были определены зависимости параметров этой модели от температуры.

При всем вышесказанном, строгой границы применения реологических моделей для сырья растительного происхождения не установлено: Макаров Е.С. в своих исследованиях считал прессуемый материал влажностью от 12 до 16 % псевдопластическим, а Полищук В.Ю. тот же материал рассматривал как пластичное тело с переменным пределом текучести.

Экспериментальным исследованиям по изучению реологических свойств экструдированных кормовых продуктов посвящен большой объем работ многих учёных. Проведенный анализ математических моделей показывает, что в большинстве приведенных моделей материал рассматривается как упруго-вязкопластичное тело (неньютоновская жидкость, псевдопластическое тело и т.д.), вместе с тем, сырье, поступает в экструдер в сыпучем состоянии. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс преобразования сыпучего материала в упруго-вязкопластичный недостаточно изучен. Математические модели не учитывают структурно-механических преобразований, происходящих в экструдированном материале, и не содержат ограничения на физико-химические и органолептические преобразования.

## **1.6 Заключение по обзору источников литературы**

Рост продуктивности молодняка мясного скота основан на эффективном использовании питательных веществ рационов. Для увеличения мясной продуктивности необходимы рационы с повышенным содержанием протеина и обменной энергии. Биологическая полноценность протеина зависит от его

аминокислотного состава. Чем богаче протеин корма по аминокислотному составу, тем он лучше усваивается животными.

Балансируют рационы большинству видов сельскохозяйственных животных по энергии, протеину и отдельным минеральным веществам зерновыми кормами, так как они содержат большое количество легкоперевариваемых питательных веществ.

Эффективное использование питательных веществ зерновых культур, входящих в корма, заключается в повышении их питательной и биологической ценности за счет правильной заготовки и хранения, а также дополнительной обработки. В этом направлении к наиболее перспективным следует отнести способы, основанные на высокотемпературных режимах обработки. Одним из таких способов является экструзия.

Рациональная технология производства экструдированных кормовых продуктов должна обеспечивать сохранность полезных свойств сырья на каждом этапе его переработки. В связи с этим является целесообразным изучение изменения свойств и структуры перерабатываемого материала в процессе экструзии.

Широкое применение в промышленности получили шнековые пресс-экструдеры, которые выпускаются с одним или двумя шнеками. Однако анализ литературных источников показал, что наибольшее предпочтение при производстве экструдированных кормовых продуктов отдается одношнековым пресс-экструдерам.

Современные одношнековые прессы имеют большие энергозатраты на производство единицы продукции (100-300 кВт·ч/т). Установлено, что технологический процесс экструдирования и его энергоемкость зависят от конструктивных особенностей шнека.

При производстве экструдированных кормовых продуктов является важным обеспечением условий как можно более низкого полного напряжения в перерабатываемом материале в зонах плавления и дозирования пресс-экструдера с целью предотвращения механического разрушения материала и снижения

энергоёмкости процесса экструзии. А также одновременно создания как можно более высокой плотности перерабатываемого материала, с целью получения готового продукта на выходе из экструдера более плотной и прочной структуры, обеспечивающей требуемое качество экструдированного кормового продукта. Этого можно достигнуть за счет оперативного изменения параметров воздействия на перерабатываемый материал в зависимости от его структуры.

Проведенный анализ существующих конструкций шнеков пресс-экструдеров для производства экструдированных кормовых продуктов позволяет сделать вывод о том, что необходимо разработать конструкцию шнека с возможностью оперативного изменения его параметров: угла наклона и шага винтовой лопасти шнека непосредственно в процессе работы, что позволит снизить энергоёмкость процесса экструдирования и повысить качество производимой продукции.

В процессе экструзионной обработки происходят значительные структурно-механические и химические изменения перерабатываемого материала. Степень уплотнения перерабатываемого материала в шнековой камере пресс-экструдера имеет непосредственную взаимосвязь с температурой и давлением, и, как следствие, влияет на глубину химических преобразований в перерабатываемом материале. Что в свою очередь отражается на питательной и энергетической ценности кормов и как следствие на мясной продуктивности сельскохозяйственных животных.

Анализ физико-химических процессов, происходящих при экструзии показывает, что такие рекомендуемые величины параметров, как влажность, температура перерабатываемого материала, можно непосредственно перенести с лабораторного на промышленный экструдер. Однако, при перенесении таких рекомендуемых величин, как диаметры фильер, частота вращения шнека и степень сжатия, возникают определенные сложности, так как это влечет за собой значительные изменения параметров процесса. Эти зависимости достаточно сложные, и изучение влияния каждого из параметров на функциональные свойства готового продукта является достаточно трудоемким. Это

свидетельствует о необходимости теоретического исследования процесса экструзии с последующей разработкой математической модели и проведении экспериментальных исследований для установления зависимости параметров экструдированного материала от параметров технологического процесса.

Проведенный анализ математических моделей показывает, что в большинстве приведенных моделей материал рассматривается как упруго-вязко-пластичное тело (неньютоновская жидкость, псевдопластическое тело и т.д.), вместе с тем, сырье, поступает в экструдер в сыпучем состоянии. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс преобразования сыпучего материала в упруго-вязко-пластичный недостаточно изучен. Математические модели не учитывают структурно-механических преобразований, происходящих в экструдированном материале, и не содержат ограничения на физико-химические и органолептические преобразования.

### **Цели и задачи исследования**

Учитывая результаты проведенного анализа, целью настоящей работы является совершенствование конструктивных параметров шнека пресс-экструдера для обеспечения снижения энергозатрат на процесс экструдирования и повышения качества готового продукта.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Теоретически обосновать предлагаемую конструкцию пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека. Разработать математическую модель, учитывающую структурно-механические преобразования, происходящие в экструдированном материале.

2. Установить зависимости параметров экструдированного материала от параметров технологического процесса. Установить влияние параметров технологического процесса на физико-химические параметры и на изменение химического состава зернового сырья в процессе экструзии.

3. Определить оптимальные режимы и параметры процесса экструдирования для обеспечения снижения энергоемкости и повышения качества готового кормового продукта.

4. Разработать конструкцию пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека. Экспериментально подтвердить целесообразность применения разработанной конструкции пресс-экструдера с точки зрения удельных затрат энергии на проведение процесса экструдирования и качества экструдированного кормового продукта.

5. Изучить влияние кормового продукта, полученного на разработанной конструкции пресс-экструдера на повышение питательной и энергетической ценности рационов и, как следствие, повышение мясной продуктивности скота. Дать оценку экономической эффективности разработанной конструкции пресс-экструдера.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРЕ

### 2.1 Теоретическое обоснование конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека

За основу была принята конструкция стандартно работающего, выпускаемого серийно ОАО «Орстан» с 1995 по 2010 год пресс-экструдера для переработки растительного сырья ПЭШ – 60/4. Для данной конструкции пресс-экструдера рабочая длина шнека составляет  $H_{p.ш.} = 0,65$  м, наружный диаметр винтовой линии  $D_d = 0,059$  м, диаметр вала шнека  $D_s = 0,04$  м. Применяются шнеки с шагом  $W = 0,024 \div 0,072$  м в зависимости от вида перерабатываемого материала, т.е. отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D = 0,4 \div 1,2$ . Шнековая камера имеет внутренний диаметр  $D_{1к} = 0,06$  м. Шнек имеет прессующую головку и сменный комплект матриц в зависимости от вида производимой продукции. Частота вращения шнека  $\omega$ , может меняться в пределах от 60 до 180 об/мин.

Недостатками такой конструкции экструдера являются: большая энергоемкость процесса, недостаточная однородность и невысокое качество готовых изделий, из-за отсутствия возможности оперативного контроля качества, а также регулирования угла наклона витков шнека по отношению к осевой линии в зоне загрузки, а, следовательно, отсутствие возможности регулирования скорости подачи материала в зону плавления в зависимости от вида перерабатываемого материала, что приводит к недостаточному или наоборот избыточному уплотнению материала в зоне загрузки.

В.Г. Коротковым, В.П. Поповым, В.П. Ханиным, М.Ю. Шрейдер и др. предпринимались попытки определения свойств перерабатываемых материалов непосредственно в процессе работы (патент РФ №2338442). Было выявлено, что

обеспечение определенного крутящего момента, измеряемого по степени закручивания головки матрицы, позволяет стабильно получать высококачественную продукцию.

К. Раувендаль выделил два состояния, в которых находится перерабатываемый материал в шнековой камере: сыпучее и вязко-пластичное. В начале движения в шнековой камере сыпучий материал проходит зону загрузки, к концу которой он заполняет весь объем межвинтового канала. В предварительных экспериментах было выявлено, что для экструдеров с внутренним диаметром шнековой камеры  $D_{1к} = 0,06$  м концом зоны загрузки следует считать расстояние от загрузочного устройства  $z_1 = 0,08$  м.

Также в предварительных экспериментах было выявлено, что для снижения энергоемкости и повышения качества готового продукта преобразование сыпучего материала в вязко-пластичный является целесообразным завершить в первой половине рабочей камеры экструдера, т.е. для рабочей длины шнека  $H_{р.ш.} = 0,65$  м данные преобразования целесообразно завершить на расстоянии  $z_2 = 0,3$  м от загрузочного устройства. Таким образом, из выше сказанного можно сделать вывод, что устройства для измерения крутящих моментов, определяющие физико-механические параметры перерабатываемого материала, следует устанавливать в конце зоны загрузки, а также в месте перехода материала из сыпучего состояния в вязко-пластичное и в конце шнековой камеры, т.е. для пресс-экструдера с внутренним диаметром шнековой камеры  $D_{1к} = 0,06$  м и рабочей длиной шнека  $H_{р.ш.} = 0,65$  м – установить на расстоянии  $z_1 = 0,08$  м,  $z_2 = 0,3$  м и  $z_3 = 0,6$  м от загрузочного устройства, что обеспечит возможность оперативного контроля качества. Подробное описание устройств для измерения крутящих моментов приведено в п. 3.3.1.

Так как основные преобразования в перерабатываемом материале происходят в зоне плавления (т.е. переход материала из сыпучего состояния в вязко-пластичный), то выполнять шнек с изменяющимся непосредственно в процессе работы углом наклона витков в зоне дозирования не является

целесообразным. Также в связи с высоким давлением в зоне дозирования в настоящее время это не представляется технически возможным. Поэтому было принято решение разработать конструкцию шнека с изменяющимся углом наклона винтовой линии непосредственно в процессе работы в зоне загрузки и плавления.

В предлагаемой конструкции витки шнека в зоне загрузки и плавления выполнены с возможностью осевого перемещения за счет вращения приводным механизмом резьбового вала (рисунок 2.1), расположенного в теле шнека, на котором расположены втулки с установленными пальцами, соединенными с витками шнека и совершающими движение по направляющим, выполненным также в теле шнека. При этом резьбовой вал в теле шнека (при условии соблюдения равновесия между нагрузками на шнек и резьбовой вал и внутреннем диаметре шнека  $D_s = 0,04$  м) должен иметь резьбу  $M = 20 \times 1,5$ , что соответствует изменению шага винтовой линии на 1,5 мм за один оборот резьбового вала.

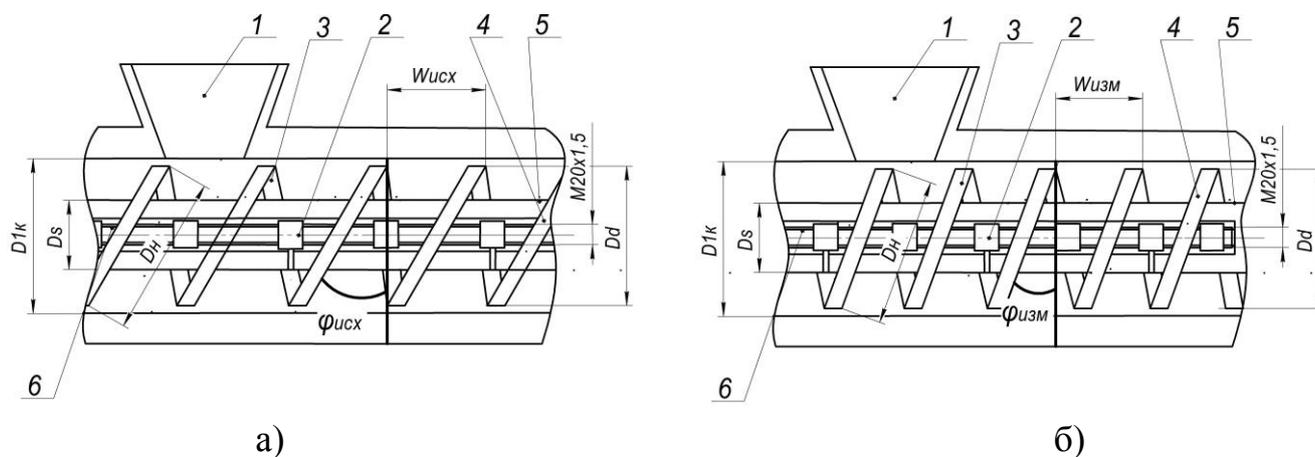


Рисунок 2.1 – Изменение угла наклона и шага витков шнека пресс-экструдера: а) исходный угол наклона и шаг витков шнека, б) измененный угол наклона и шаг витков шнека; 1 – загрузочное устройство; 2 – втулка с установленным пальцем; 3 – шнековая камера; 4 – витки шнека; 5 – шнек; 6 – резьбовой вал в теле шнека

Изменение угла наклона винтовой линии шнека при этом рассчитывается по формулам:

$$\varphi_{изм} = \arcsin \frac{W_{исх} / 2}{D_H}, \quad (2.1)$$

где  $\varphi_{изм}$  - измененный угол наклона винтовой линии шнека;

$W_{исх}$  - исходный шаг винтовой линии шнека, м;

$D_H$  - расстояние между крайними точками наклонной поверхности витка шнека, м.

$$D_H = \frac{W_{исх}}{2 \sin \varphi_{исх}}, \text{ м}, \quad (2.2)$$

где  $\varphi_{изм}$  - исходный угол наклона винтовой линии шнека.

$$W_{изм} = W_{исх} + 1,5 \cdot \varphi_{об}, \text{ м} \quad (2.3)$$

где  $W_{изм}$  - измененный шаг винтовой линии шнека, м;

$\varphi_{об}$  - число оборотов резьбового вала, расположенного в теле шнека.

## 2.2 Разработка математической модели уплотнения материала в экструдере

Сырье, используемое для производства экструдированных кормовых продуктов, зачастую измельчается в процессе технологической обработки и переходит в дисперсную систему [67]. Частицы дисперсной фазы при этом окружены дисперсной (непрерывной) средой. Когда концентрация частиц дисперсной фазы высокая, система приобретает упругость и пластичность и перестает быть легкотекучей. В этом случае ее охарактеризуют как твердообразную. Система является легкотекучей и жидкообразной при невысокой концентрации, т.е. упруго-пластичные свойства не выражены. Кормовые продукты в дисперсном и натуральном виде отличаются определенным строением, т. е. структурой, характеризующейся видом связей между элементами и обуславливающей проявление различных физических свойств. Обработываемый

материал не имеет ни чисто упругих, ни чисто пластичных свойств, поэтому для описания его поведения требуется создание новых реологических моделей.

Фактически процесс преобразования кормового материала в экструдере следует разделить на два этапа:

- превращение материала из твердого состояния в твердо-текучее (пластификация);  
уплотнение и формование твердо-текучего материала (т.е. дозирование пластифицированного материала).

### **2.2.1 Разработка математической модели для зоны плавления**

Первый всесторонний анализ движения твердого материала в одношнековых экструдерах был проведен Дарнеллом и Молом в 1956 г. [181]. Позже многие исследователи развили работы Дарнелла и Мола, однако основа анализа осталась неизменной. Для того чтобы прийти к количественному описанию процесса движения твердого вещества, вызываемого силой трения, Дарнеллом и Молом были сделаны следующие предположения [181]:

1. Отдельные твердые частицы ведут себя подобно сплошной среде.
2. Твердая пробка находится в контакте со всей стенкой канала, то есть поверхностью цилиндра, телом шнека, активной стороной нарезки и пассивной стороной нарезки.
3. Глубина канала постоянна.
4. Зазором между выступом нарезки шнека и цилиндром можно пренебречь.
5. Твердая пробка движется как поршень.
6. Давление является только функцией расстояния вдоль канала шнека.
7. Коэффициент трения не зависит от давления.
8. Силы тяжести пренебрежимо малы.
9. Изменением плотности твердой фазы материала в пробке пренебрегаем.

Первые пять допущений принимаются в большинстве теорий движения твердого материала. Последние пять допущений часто различными

исследователями не рассматривались. Основной метод анализа движения материала состоит в рассмотрении элемента твердой пробки в канале шнека и определении всех сил, которые действуют на него. Определяющие силы – это силы трения на границах и силы, возникающие вследствие градиентов давления в твердом слое [181].

На рисунке 2.2 представлена схема (К. Раувендааль «Экструзия полимеров», 2011г) [147], иллюстрирующая различные силы, которые действуют на элемент твердой пробки. При этом вводится допущение, что шнек неподвижен, а цилиндр вращается.

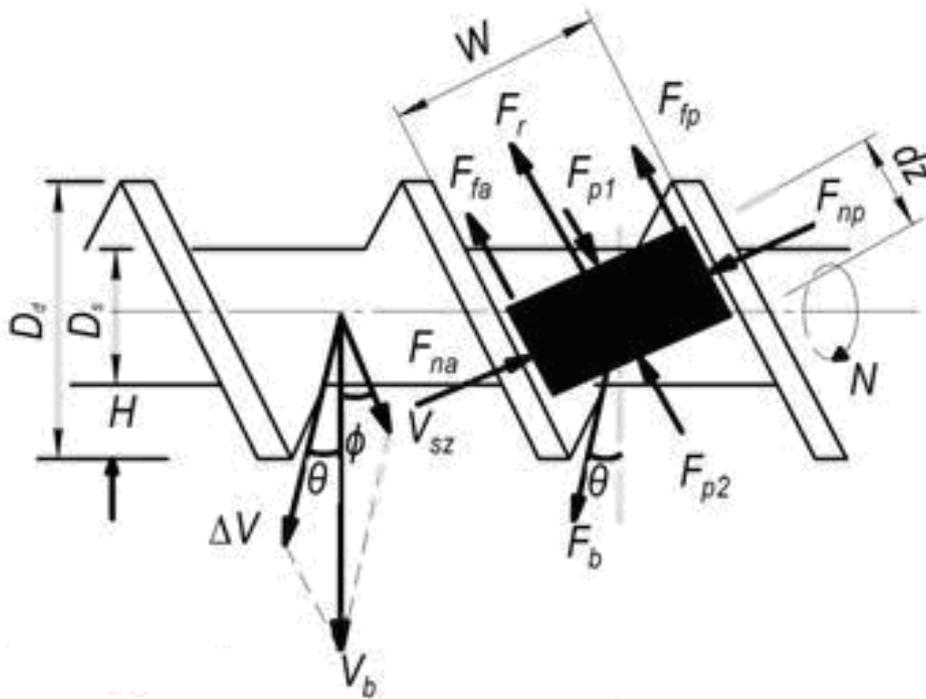


Рисунок 2.2 - Силы, действующие на элемент твердого слоя, и соответствующая диаграмма скоростей [147]:  $F_r$  - сила трения между твердой пробкой и телом шнека задается уравнением;  $F_{na}$  - нормальная сила, действующая на твердый слой на активной стороне нарезки;  $F_{np}$  - нормальная сила, действующая на твердый слой на пассивной стороне нарезки;  $F_{fa}$  - сила трения между твердой пробкой и активной стороной нарезки;  $F_{fp}$  - сила трения между твердым слоем и пассивной стороной нарезки;  $F_{p1}$  - сила, действующая на поверхности элемента твердой пробки вследствие локального давления  $P$ ;  $F_{p2}$  -

сила, действующая на поверхности элемента твердой пробки вследствие локального давления  $P+dP$ ;  $F_b$  сила трения между твердым слоем и поверхностью цилиндра;  $H$  - глубина канала;  $W$  - расстояние между витками шнека;  $\varphi$  - угол наклона витков шнека;  $\theta$  - угол с плоскостью, перпендикулярной оси шнека  $D_d$  - диаметр шнека внешний;  $D_s$  - диаметр шнека внутренний;  $v_b$  - скорость цилиндра;  $v_{sx}$  - скоростью твердого слоя;  $\Delta v$  - разность скоростей между цилиндром и твердым слоем

$F_r$  - сила трения между твердой пробкой и телом шнека задается уравнением

$$F_r = PWdx f_s, \quad (2.4)$$

где  $P$  - давление, Па;

$f_s$  - динамический коэффициент трения на поверхности шнека,

$W$  - расстояние между витками шнека, м.

$F_{na}$  - нормальная сила, действующая на твердый слой на активной стороне нарезки, определяется соотношением:

$$F_{na} = PHdx + F^*, \quad (2.5)$$

где  $H$  - глубина канала, м;

$F$  - дополнительная нормальная сила, Н.

$F_{np}$  - нормальная сила, действующая на твердый слой на пассивной стороне нарезки, Н:

$$F_{np} = PHdx, \quad (2.6)$$

$F_{fa}$  - сила трения между твердой пробкой и активной стороной нарезки:

$$F_{fa} = F_{na} f_s, \quad (2.7)$$

$F_{fp}$  - сила трения между твердым слоем и пассивной стороной нарезки:

$$F_{fp} = PHdx f_s, \quad (2.8)$$

$F_{p1}$  - сила, действующая на поверхности элемента твердой пробки вследствие локального давления  $P$ :

$$F_{p1} = WHP, \quad (2.9)$$

$F_{p2}$  - сила, действующая на поверхности элемента твердой пробки вследствие локального давления  $P+dP$ :

$$F_{p2} = WH(P + dP), \quad (2.10)$$

Очевидно, если градиент давления в направлении вдоль канала равен нулю, тогда  $F_{p1} = F_{p2}$ . Результирующая сила  $F_b$  представляет собой силу трения между твердым слоем и поверхностью цилиндра:

$$F_b = PWdx f_b, \quad (2.11)$$

где  $f_b$  - динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра.

Сила  $F_b$  составляет угол  $\theta$  с плоскостью, перпендикулярной оси шнека (см. рисунок 2.2). Направление действия силы  $F_b$  определяется направлением разности векторов скоростей между цилиндром и твердым слоем:

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_b - \vec{v}_{sx}, \quad (2.12)$$

где  $\vec{v}_b$  - вектор скорости цилиндра и  $\vec{v}_{sx}$  - вектор скорости твердого слоя соответственно. Из диаграммы скоростей, изображенной на рисунке 2.1, становится понятным направление  $\Delta \vec{v}$  и  $F_b$ . Угол  $\theta$  представляет собой угол, определяющий направление движения твердого материала. Если этот угол определен, тогда скорость твердого слоя может быть вычислена непосредственно из уравнения:

$$v_{sx} = v_b \left[ \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{\operatorname{tg}(\theta + \varphi)} \right], \quad (2.13a)$$

где  $\varphi$  - угол наклона витков шнека

Уравнение (2.13a) может быть переписано следующим образом:

$$v_{sx} = v_b \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)}, \quad (2.13b)$$

Разность векторов скоростей  $\Delta v$  между скоростью цилиндра  $v_b$  и скоростью твердого слоя  $v_{sx}$  определяется следующим образом:

$$\Delta v = (v_b^2 + v_{sx}^2 - 2|v_b||v_{sx}|\cos \varphi)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.14)$$

Выражение для угла движения твердого материала  $\theta$  получается из баланса силы в направлении оси канала:

$$PWdx f_b [\cos(\theta + \varphi) - f_s \sin(\theta + \varphi)] = WHdP + Pdx f_s (W + 2H), \quad (2.15)$$

Для того чтобы получить зависимость давления от расстояния в направлении оси канала, уравнение (2.15) следует проинтегрировать. Давление при  $x=0$  равно  $P(x=0) = P_0$ . Тогда решение уравнения представляется следующим образом:

$$\ln \frac{P}{P_0} = \left\{ \frac{f_b}{H} [\cos(\theta + \varphi) - f_s \sin(\theta + \varphi)] - f_s \left( \frac{W + 2H}{Wh} \right) \right\} x, \quad (2.16)$$

где  $x$  - расстояние от загрузочного устройства до измерительного элемента.

Уравнение (2.16) показывает, что при определенном угле движения твердого материала давление увеличивается экспоненциально как функция расстояния вдоль канала. Это означает, что в зоне движения твердого материала, по крайней мере, теоретически могут создаваться очень высокие давления. Уравнение (2.16) может быть преобразовано таким образом, чтобы получить законченную форму выражения для угла движения твердого материала:

$$\theta = \arcsin \left[ \frac{(1 + f_s^2 - k^2)^{\frac{1}{2}} - f_s k}{1 + f_s^2} \right] - \varphi, \quad (2.17)$$

где

$$k = \frac{H}{f_b z} \ln \frac{P}{P_0} + \frac{f_s}{f_b} \left( 1 - \frac{2H}{W} \right), \quad (2.18)$$

На основании уравнения (2.18) угол движения, и, следовательно, скорость движения твердого материала можно рассчитать, если известен градиент давления. Процедуру расчета можно изменить на противоположную. Если фактическая скорость движения твердого материала известна, то градиент давления может быть вычислен на основе уравнения (2.16). Однако угол движения в уравнении (2.16) должен быть выражен как функция скорости твердой пробки. Профиль давления, полученный на основании уравнения (2.16) (модель плоского канала), может быть записан следующим образом:

$$P(x) = P_0 \exp \left[ \left( f_b \frac{1 - a f_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \frac{x}{H} \right], \text{ Па}, \quad (2.19)$$

где  $a = \operatorname{tg}(\theta + \varphi) = \frac{v_b \sin \varphi}{v_b \cos \varphi - v_{sx}}$ ;

$\varphi$  - угол наклона витков шнека;

$\theta$  - угол, определяющий направление движения твердого материала;

$v_b$  - скорость цилиндра, м/с;

$v_{sx}$  - скорость твердого слоя, м/с;

$P_0$  - давление при  $x = 0$ , Па;

$f_s$  - динамический коэффициент трения на поверхности шнека;

$f_b$  - динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра;

$x$  - расстояние от загрузочного устройства, м;

$W$  - расстояние между витками шнека, м;

$H$  - глубина канала, м.

Из уравнения (2.19) видно, что экспоненциальная составляющая возрастает с увеличением  $f_b$  и уменьшается с ростом  $f_s$ . Таким образом, подъем давления оказывается наиболее быстрым, когда  $f_b$  велико и  $f_s$  мало. Экспоненциальная составляющая обратно пропорциональна глубине канала  $H$ . Следовательно, давление будет расти более медленно, если глубина канала велика.

Согласно законам теоретической механики (рисунок 2.3) в каждом поперечном сечении крутящий момент прессования можно определить с помощью формулы:

$$M_x = \frac{D_s + D_d}{2} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_d^2 - D_s^2) \cdot P_x, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.20)$$

где  $D_d$  - диаметр шнека внешний, м;

$D_s$  - диаметр шнека внутренний, м;

$P_x$  - давление, Па;

$\varphi$  - угол наклона винтовой лопасти шнека.

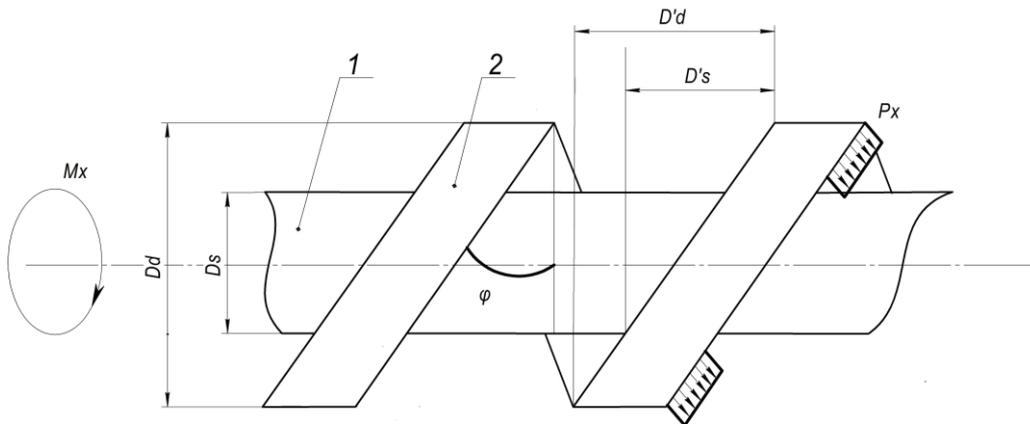


Рисунок 2.3 – Параметры шнека пресс-экструдера: 1 – вал шнека; 2 – винтовая лопасть шнека;  $D_d$  - диаметр шнека внешний;  $D_s$  - диаметр шнека внутренний;  $P_x$  - давление;  $\varphi$  - угол наклона винтовой лопасти шнека;  $M_x$  - крутящий момент

Преобразовав, получим:

$$M_x = \frac{\pi}{8 \cdot \cos^2 \varphi} (D_d + D_s) \cdot (D_d'^2 - D_s'^2) \cdot P_x, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.21)$$

Проинтегрировав произведение формул (2.19) и (2.21) по  $x$ , получим крутящий момент в конце зоны плавления:

$$M_{nz} = x \int_0^{x_n} M_x \cdot dx$$

$$M_{nz} = \frac{\pi \cdot P_0 \cdot (D_d + D_s) \cdot (D_d'^2 - D_s'^2) / 8 \cdot \cos^2 \varphi \cdot x}{\left[ \left( f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \cdot \frac{1}{H} \right]} \cdot \exp \left[ \left( f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \cdot \frac{x}{H} \right], \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.22)$$

## 2.2.2 Разработка математической модели для зоны дозирования

Для реологического описания поведения сложных тел, учитывая свойства их компонентов, можно использовать различные комбинации простейших моделей идеальных тел, при этом каждая из них обладает только одним физико-механическим свойством. Модели могут комбинироваться последовательно или параллельно. К основным сложным моделями относят упруго-пластичное, вязко-упругое и вязко-пластичное тело.

Рассматривая подсистему, которая описывает процессы, происходящие в прессуемом материале, массовыми силами можно пренебречь, по сравнению с напряжениями, которые возникают при движении материала по рабочим органам. В.Ю. Полищук, В.Г. Коротков, В.П. Ханин и др. [43,129,134] рассмотрели модель прессующего механизма в координатах  $Ox$ ,  $Oy$ , и  $Oz$ , которая представлена на рисунке 2.4.

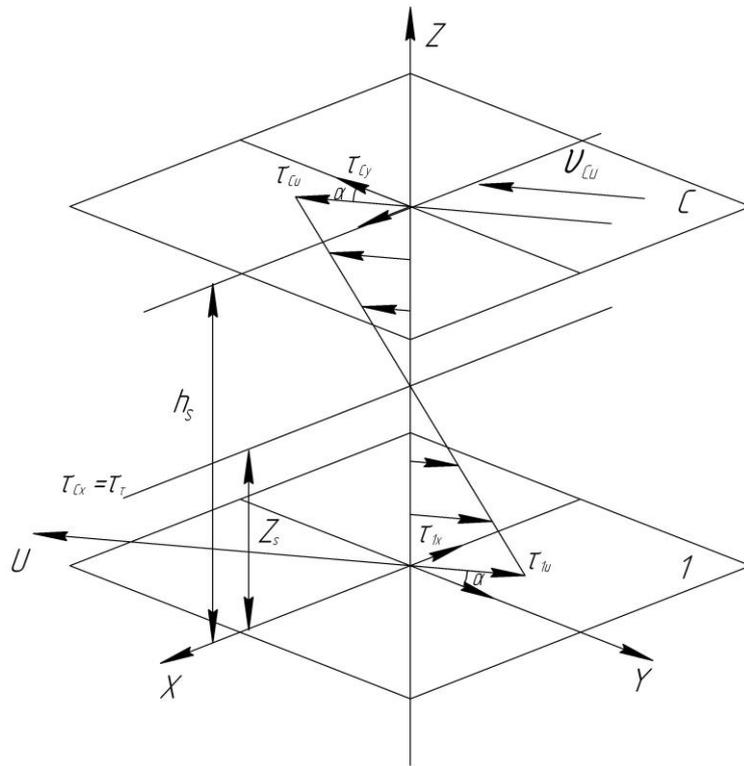


Рисунок 2.4 - Модель прессующего механизма

Здесь направление оси  $Ox$  совпадает с направлением оси корпуса шнека, а направление оси  $Oy$  – окружное. При этом ось канала шнека  $Oи$  образует с осью  $Oy$  угол  $\alpha$  (где  $\alpha$  равен углу наклона витков шнека  $\varphi$ ).

Плоскость развертки шнекового цилиндра обозначена индексом  $C$ , а плоскость развертки стержня индексом  $I$ . Плоскость  $C$  движется вдоль оси канала шнека со скоростью  $v_c$  или со скоростями вдоль осей координат  $v_x$  и  $v_y$ .

В.Ю. Полищук, В.Г. Коротков и В.П. Ханин полагали, что пластическая гайка на плоскости  $C$  развивает касательное напряжение  $\tau_{Cx}$ , двигаясь с проскальзыванием. Пренебрегая трением материала о витки шнека и рассматривая его движение как перемещение тела по наклонной плоскости, они определили, что окружное напряжение, необходимое для создания осевого напряжения  $\tau_{Cx}$  равно:

$$\tau_{Cy} = \tau_{Cx} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.23)$$

Касательное напряжение  $\tau_{Cy}$  образует движущую силу. Вдоль оси  $Ou$  действует его проекция  $\tau_{Cu}$ , тогда:

$$\tau_{Cu} = \tau_{Cy} \cos \varphi = \tau_{Cx} \sin \varphi, \quad (2.24)$$

В.Ю. Полищук, В.Г. Коротков и В.П. Ханин допускали, такие реологические свойства материала при которых зависимость  $\tau$  от  $z$  линейная, а  $z_s \in (0; h_s)$  - расстояние между контактирующими с материалом пластинами. Тогда:

$$\tau_{z1} = \frac{d\tau}{dz} (z - z_s), \text{ где } z \geq z_s, \quad (2.25)$$

$$\tau_{z2} = \frac{d\tau}{dz} (z_s - z), \text{ где } z \leq z_s, \quad (2.26)$$

Через касательные напряжения в слое, граничащем с верхней пластиной  $\tau_{Cu} = \tau_{Cx} \sin \varphi$ , найдем градиент напряжений.

Из рисунка 2.3 видно, что

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{\tau_{Cu}}{h_s - z_s} \quad (2.27)$$

Преобразуя формулы (2.25) и (2.26) с учетом (2.27) получим:

$$\tau_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{h_s - z_s} (z - z_s), \text{ где } z \geq z_s \quad (2.28)$$

$$\tau_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{h_s - z_s} (z_s - z), \text{ где } z \leq z_s \quad (2.29)$$

По литературным данным, подтвержденным экспериментально, движение материала после его превращения в упруго-вязкую массу (после выхода из зоны плавления) наиболее полно описывается моделью Максвелла, которая (рисунок 2.5) представляет последовательное соединение элементов Гука с модулем упругости  $G$  и Ньютона с вязкостью  $\eta$ , при этом на них действует одинаковое напряжение  $\tau$ .

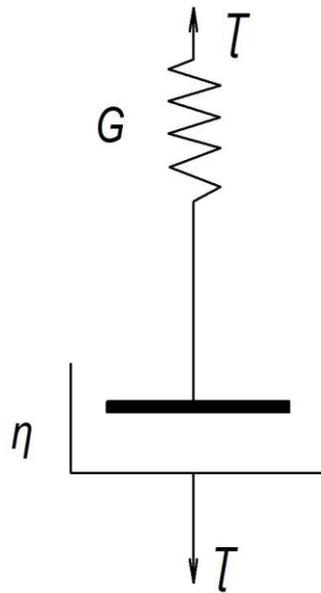


Рисунок 2.5 - Модель Максвелла

В зависимости от отношения времени релаксации к длительности эксперимента, тело Максвелла может вести себя как вязкое или как упругое. Если под воздействием однократно приложенного усилия растянуть пружину, а затем мгновенно снять нагрузку, то поршень не успеет прийти в движение, и тогда система будет вести себя как упругое тело. Однако если нагрузка приложена постоянно и пружина находится в растянутом состоянии, то она начнет постепенно перемещать поршень вверх – релаксировать. Тогда система будет вести себя почти как ньютоновская жидкость.

Реологическое уравнение тела Максвелла имеет вид:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta}, \text{ с}^{-1}, \quad (2.30)$$

где  $G$  - модуль упругости, Па;

$\eta$  - вязкость, Па·с;

$\tau$  - касательное напряжение, Па;

$\dot{\tau}$  - скорость изменения касательного напряжения, Па/с.

Для измерения изменения касательного напряжения используют два понятия: относительное изменение касательного напряжения  $\frac{d\tau}{dz}$ , используемое в моделях С.Ю. Полищука с соавторами (уравнение 2.27) и скорость изменения касательного напряжения  $\dot{\tau}$ , используемое в реологическом уравнении максвелла (2.30). В первом случае модуль упругости  $G$  используется с единицей измерения Па, во втором случае  $G'$  с единицей измерения Па·с/м (Мачихин Ю.А. «Инженерная реология пищевых материалов» 1981 г). В связи с тем, что при выводе формул 2.27 – 2.29 учитывалось изменение касательного напряжения от расстояния, на которое производится сдвиг, в дальнейшем при выводе формул используем  $G'$ , Па·с/м.

Учитывая уравнения (2.28), (2.29) и (2.30) получаем:

$$\dot{\gamma}_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{1}{G'} + \frac{z - z_s}{\eta} \right), \text{ где } z \geq z_s \quad (2.31)$$

$$\dot{\gamma}_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{1}{G'} + \frac{z_s - z}{\eta} \right), \text{ где } z \leq z_s \quad (2.32)$$

Проинтегрируем уравнения (2.31) и (2.32), с учетом, что скорость сдвига материала можно выразить через относительную скорость с помощью выражения:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_z}{dz} \quad (2.33)$$

Приняв условия прилипания на пластинах, получаем:

$$v_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{z}{G'} + \frac{z^2 - 2z_s \cdot z}{2\eta} \right) + C_1, \text{ где } z \geq z_s \quad (2.34)$$

$$v_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{z}{G'} + \frac{2z_s \cdot z - z^2}{2\eta} \right) + C_2, \text{ где } z \leq z_s \quad (2.35)$$

Учитывая, что при  $z = 0$ ,  $v_{z1} = v_{Cu}$ , а при  $z = h_s$ ,  $v_{z2} = v_0$  получим:

$$C_1 = v_{Cu} - \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{h_s}{G'} + \frac{h_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right), \quad (2.36)$$

$$C_2 = v_0 \quad (2.37)$$

Тогда:

$$v_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{z - h_s}{G'} + \frac{z^2 - h_s^2 + 2z_s(h_s - z)}{2\eta} \right) + v_{Cu}, \text{ где } z \geq z_s \quad (2.38)$$

$$v_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{z}{G'} + \frac{2z_s \cdot z - z^2}{2\eta} \right) + v_0, \text{ где } z \leq z_s \quad (2.39)$$

Если при  $z = z_s$ ,  $v_{z1} = v_{z2}$ , тогда с учетом формул (2.38), (2.39) получим:

$$v_{cu} = v_0 + \frac{\tau_{cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{h_s}{G'} + \frac{h_s^2 + 2z_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right), \text{ м/с} \quad (2.40)$$

Исходя из условий, что  $v_{cu} = \omega'_3 \cdot D_d / 2 \cdot \cos \varphi$ ;  $v_0 = 0$  получим:

$$\omega'_s \cdot D_d / 2 \cdot \cos \varphi = \frac{\tau_{cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left( \frac{h_s}{G'} + \frac{h_s^2 + 2z_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right), \quad (2.41)$$

Выразим из уравнения касательное напряжение у стенки:

$$\tau_{cu} = \frac{\omega'_s \cdot D_d / 2 \cdot \cos \varphi \cdot (h_s - z_s)}{\left( \frac{h_s}{G'} + \frac{h_s^2 + 2z_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right)}, \text{ Па}, \quad (2.42)$$

Учитывая линейную зависимость для касательных напряжений,  $z_s$  определяется как  $z_s = k \cdot h_s$ , где  $k$  зависит от материала шнека и цилиндра. Для наиболее широко распространенного случая, шнековая камера и шнек пресс-экструдера выполняются из одного материала  $k = \frac{1}{2}$ .

После преобразования получим:

$$\tau_{cu} = \frac{\omega'_s \cdot D_d \cdot \cos \varphi \cdot G' \cdot \eta}{4\eta + h_s \cdot G'}, \text{ Па}, \quad (2.43)$$

В результате получим уравнение для крутящего момента в конце зоны дозирования:

$$M_\phi = \frac{\omega'_s \cdot D_d \cdot \cos \varphi \cdot G' \cdot \eta}{4\eta + h_s \cdot G'} 2\pi x_1 R^2, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.44)$$

где  $R = \frac{1}{2}(D_{1к} + D_s)$ , м;

$D_{1к}$  - внутренний диаметр корпуса, м;

$x_1$  - расстояние от начала зоны плавления до измерительного элемента,

м;

Таким образом, из уравнения (2.44) крутящий момент в дозирующей зоне  $M_\phi$  может быть легко определен и применен в уравнениях для управления процессом прессования.

При движении по пластинам без проскальзывания пропускную способность матрицы  $Q$  получим через выражения (2.38) и (2.39) интегрированием элементарных потоков:

$$Q = \int_{z_s}^{h_s} v_{z_1} dz + \int_0^{z_s} v_{z_2} dz = \left( \frac{\tau_{cu}}{h_s - z_s} \right) \cdot \left( \frac{z_s^2 \cdot h_s - z_s^3 + 2z_s \cdot h_s^2 - h_s^3}{3\eta} + \frac{2z_s^2 - h_s^2}{2G} \right) + v_{cu}(h_s - z_s) + v_0 z_s, \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.45)$$

При оценке интенсивности воздействия экструзионного процесса на обрабатываемый материал можно использовать выражение для определения средней скорости сдвига псевдопластического материала:

$$\dot{\gamma}_{cp} = \frac{1}{h_s - z_s} \int_{z_s}^{h_s} \dot{\gamma}_{z_1} dz + \frac{1}{z} \int_0^{z_s} \dot{\gamma}_{z_2} dz = \frac{\tau_{cu}}{(h_s - z_s)^2} \cdot \left( \frac{h_s}{G} + \frac{(h_s - 2z_s)^2}{2\eta} \right), \text{ с}^{-1}, \quad (2.46)$$

В работе были использованы устройства для измерения крутящих моментов. Описание устройств и методики измерения крутящих моментов приведены в разделе 3. При этом использовано уравнение зависимости крутящего момента  $M$ , от скорости сдвига.

Для того чтобы описать скорость изменения реологических параметров в процессе экструдирования, запишем уравнение (2.30) в следующем виде:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\tau}{G \cdot dt} + \frac{\tau}{\eta}, \text{ с}^{-1}, \quad (2.47)$$

Преобразовав, получим уравнение с разделяемыми переменными:

$$\frac{d\tau}{\tau - \dot{\gamma} \cdot \eta} = \frac{G}{\eta} dt, \quad (2.48)$$

После его интегрирования, получим:

$$\tau - \dot{\gamma} \cdot \eta = \left( e^{-\frac{G}{\eta}} \right) \cdot C', \text{ где } C' = e^C, \quad (2.49)$$

$$\text{или } \tau = \dot{\gamma} \eta + \left( e^{-\frac{G}{\eta}} \right) \cdot C', \quad (2.50)$$

С учётом того, что в начальный момент растяжения  $\sigma_0 = 0$ , имеем:

$$0 = \dot{\gamma} \cdot \eta + e^0 \cdot C', \text{ откуда } C' = -\dot{\gamma} \cdot \eta, \quad (2.51)$$

Уравнение для касательного напряжения примет вид:

$$\tau = (\dot{\gamma} \cdot \eta) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{G}{\eta}} \right), \text{ Па}, \quad (2.52)$$

Учитывая, что для измеряющей насадки

$$M_n = \tau \cdot 2\pi \cdot L_1 \cdot R_1^2, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.53)$$

где  $L_1$  - длина зазора, м;

$R_1$  - расстояние до зазора, м.

Окончательное уравнение для крутящего момента, измеряемого устройствами, имеет вид:

$$M_n = (\dot{\gamma} \cdot \eta) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{G}{\eta}} \right) \cdot 2\pi L_1 \cdot R_1^2, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.54)$$

Полученные зависимости для расчетных крутящих моментов в конце зон плавления (2.22) и дозирования (2.44) и крутящих моментов, определяемых при

помощи устройств для их измерения (2.54) дают возможность управлять процессом экструзии.

### **Выводы по второй главе**

1. Теоретически обоснована предлагаемая конструкция пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека. Для снижения энергоемкости и повышения качества экструдированных кормовых продуктов является целесообразным выполнить шнек пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы шагом и углом наклона витков в зоне загрузки и плавления, а также установить устройства для измерения крутящих моментов в конце зон загрузки, плавления и дозирования, для обеспечения оперативного контроля качества.

2. Установлено, что для предлагаемой конструкции пресс-экструдера с внутренним диаметром шнековой камеры  $D_{\text{шк}} = 0,06 \text{ м}$  и рабочей длиной шнека  $H_{\text{р.ш.}} = 0,65 \text{ м}$  целесообразно установить устройства для измерения крутящих моментов на расстоянии 0,08 м, 0,3 м и 0,6 м от загрузочного устройства.

3. Получены зависимости изменения угла наклона и шага витков шнека от числа оборотов резьбового вала, расположенного в теле шнека (формулы 2.1-2.3)

4. При производстве экструдированных кормовых продуктов необходимо учитывать реологические свойства перерабатываемого материала. Фактически процесс преобразования кормового материала в экструдере следует разделить на два этапа: пластификация перерабатываемого материала и дозирование пластифицированного материала. На этапе пластификации перерабатываемый материал ведет себя как сыпучее тело, для которого наиболее важным параметром, определяющим его изменение, является динамический коэффициент трения. С реологической точки зрения перерабатываемый материал на этапе дозирования описывается моделью Максвелла, определяющими для которой являются модуль упругости и вязкость.

5. Разработана математическая модель, учитывающая структурно-механические преобразования, происходящие в экструдиремом материале на двух этапах: пластификации материала и его дозирования. Выявленные закономерности позволяют установить следующие зависимости:

- для конца зоны плавления – между конструктивными параметрами шнека, динамическим коэффициентом трения материала и крутящим моментом в конце зоны плавления (формула (2.22));

- для конца зоны дозирования – между конструктивными параметрами пресса, структурно-механическими параметрами перерабатываемого материала и крутящим моментом в конце зоны дозирования (формула (2.44));

- для устройств, измеряющих крутящие моменты – между конструктивными параметрами насадки и структурно-механическими свойствами перерабатываемого материала (формула (2.54)).

6. Разработанная математическая модель позволяет на основе сравнения измеряемых (2.22) и (2.44) и расчетных (2.54) крутящих моментов оперативно управлять процессом экструзии.

### 3 МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

При проведении экспериментов использовали методику, представленную на рисунке 3.1

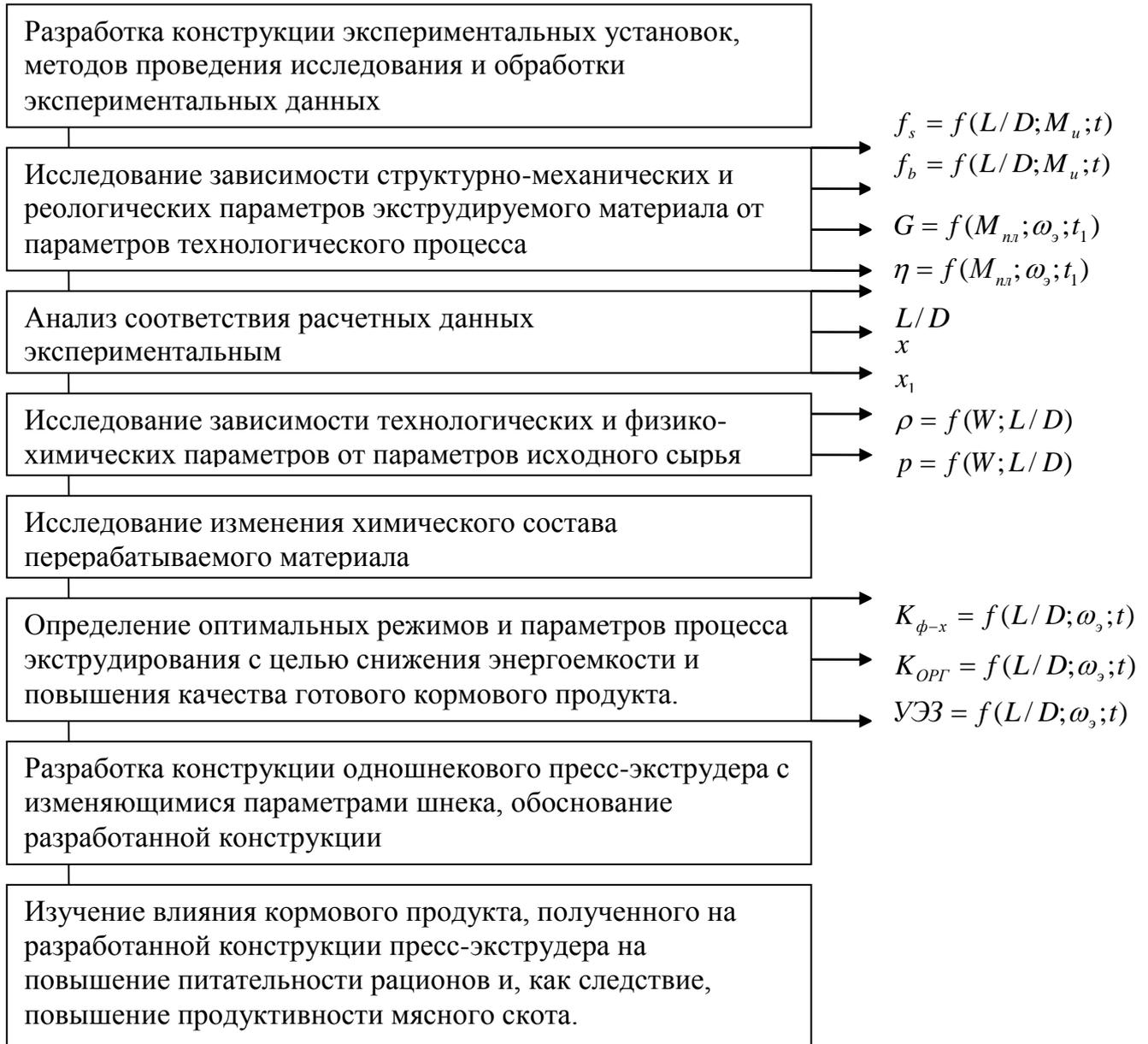


Рисунок 3.1 – Методика проведения экспериментальных исследований:  $f_s$  - динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра;  $f_b$  - динамический коэффициент на поверхности шнека;  $L/D$  - отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру;  $M_u$  - крутящий момент в конце зоны загрузки;  $t$  - температура сырья на входе в экструдер;  $G$  - модуль упругости;  $\eta$  - вязкость;  $M_{nl}$

- крутящий момент в конце зоны плавления;  $\omega$ , - частота вращения шнека;  $t_1$  - температура перерабатываемого материала;  $x$  - расстояние от загрузочного устройства до измерительного элемента;  $x_1$  - расстояние от начала зоны плавления до измерительного элемента;  $\rho$  - плотность материала в зонах шнековой камеры;  $p$  - полное напряжение, возникающее в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры;  $W$  - влажность перерабатываемого материала

Исследования были выполнены на лабораторном стенде, разработанном на базе малогабаритного пресс-экструдера ПЭШ-60/4, выпускаемого ОАО «Орстан», дополненном шнеком, конструкция которого позволяет регулировать скорость подачи обрабатываемого материала в зону сжатия, посредством оперативного изменения параметров шнека непосредственно в процессе работы, а также измерительными системами, позволяющими контролировать и снимать данные протекающего процесса.

Использовались известные и разработанные методики, приборы и приспособления для определения параметров технологического процесса (крутящего момента, частоты вращения), а также параметров перерабатываемого материала и готового кормового продукта (температуры, динамического коэффициента трения, плотности, влажности, аминокислотного состава).

Экспериментальные исследования проводились на факультете прикладной биотехнологии и инженерии Оренбургского государственного университета и во Всероссийском научно-исследовательском институте мясного скотоводства г. Оренбурга.

### **3.1 Экспериментальная установка, приборы и оборудование, применяемые при исследованиях**

Разработанный с участием автора лабораторный стенд представляет собой пресс-экструдер с изменяющимися непосредственно в процессе работы

параметрами шнека: регулируемым шагом и углом наклона витков шнека в зоне загрузки и плавления.

Схема установки представлена на рисунке 3.2

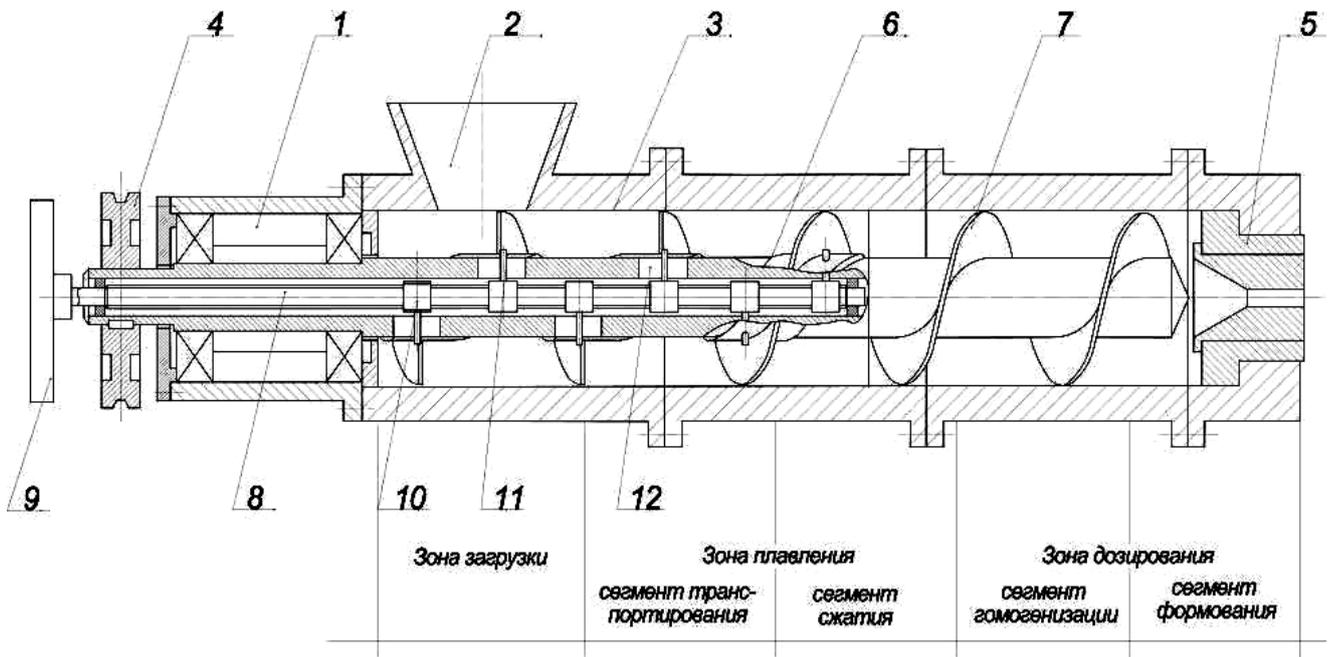


Рисунок 3.2 – Конструкция одношнекового пресс-экструдера: 1 – подшипниковый узел; 2 – загрузочная воронка; 3 – разъемные корпуса шнековой камеры; 4 – привод; 5 – формующая головка; 6 – шнек; 7 – витки шнека; 8 – резьбовой вал; 9 – приводной механизм; 10 – втулки с установленными пальцами 11; 12 – направляющие

Конструкция шнековой камеры пресс-экструдера была условно разделена на три зоны: зона загрузки, зона плавления (включающая сегмент транспортирования и сегмент сжатия), дозирующая зона (включающая сегмент гомогенизации и сегмент формования).

Принцип работы предлагаемого пресс – экструдера следующий: сырье под воздействием вращающихся витков 7 шнека 6 перемещается в сегмент сжатия зоны плавления. После сжимания, перерабатываемый материал поступает в сегмент гомогенизации дозирующей зоны, где происходит превращение размягченных частиц в однородный расплав. Затем перерабатываемый материал

попадает в сегмент формования зоны дозирования и продавливается через формующую головку 5.

Когда плотность поступающего на переработку материала изменяется [185], возникает необходимость в изменении скорости подачи материала в сегмент сжатия зоны плавления. Данная скорость регулируется при помощи изменения угла наклона витков 7 шнека 6, которое осуществляется следующим образом: втулки 10, с установленными в них пальцами 11, приводимые в движение вращением резьбового вала 8, совершают перемещение вдоль оси шнека 6, увлекая при этом за собой витки 7. При изменении расстояния между витками 7, происходит изменение их угла наклона. В результате чего изменяется соотношение тангенциальной (обеспечивающей вращение и перемешивание материала) и аксиальной (обеспечивающей продвижение материала вдоль шнекового канала) составляющей сил воздействия шнека на обрабатываемый материал (данные величины определяются зависимостями (2.22) и (2.44)).

При изменении данного соотношения, изменяется скорость перемещения материала в зоне загрузки и сегменте транспортирования зоны плавления, и, как следствие скорость подачи его в сегмент сжатия зоны плавления. Таким образом, появляется возможность регулирования скорости подачи материала в сегмент сжатия зоны плавления, а также регулирования давления материала на выходе из сегмента сжатия зоны плавления, в сегментах гомогенизации и формования зоны дозирования, что обеспечивает снижение энергоемкости процесса экструзии и получение высококачественной продукции.

Лабораторная установка с измеряющими элементами показана на рисунке 3.3.

Шнек пресс-экструдера приводится во вращение приводным механизмом, состоящим из редуктора, открытой зубчатой передачи и асинхронного электродвигателя. Скорость вращения шнека изменяется посредством подключенного к двигателю частотного преобразователя Toshiba VF-AS1.

Установка, представленная на рисунке 3.3, работает следующим образом. На станине 1 установлен электродвигатель, который через ременную передачу

вращает быстроходный вал редуктора 2. Тихоходный вал редуктора, посредством открытой зубчатой передачи, передает крутящий момент на шнек, который расположен в цилиндрическом корпусе 4 с зафиксированной на нем формующей головкой 5.

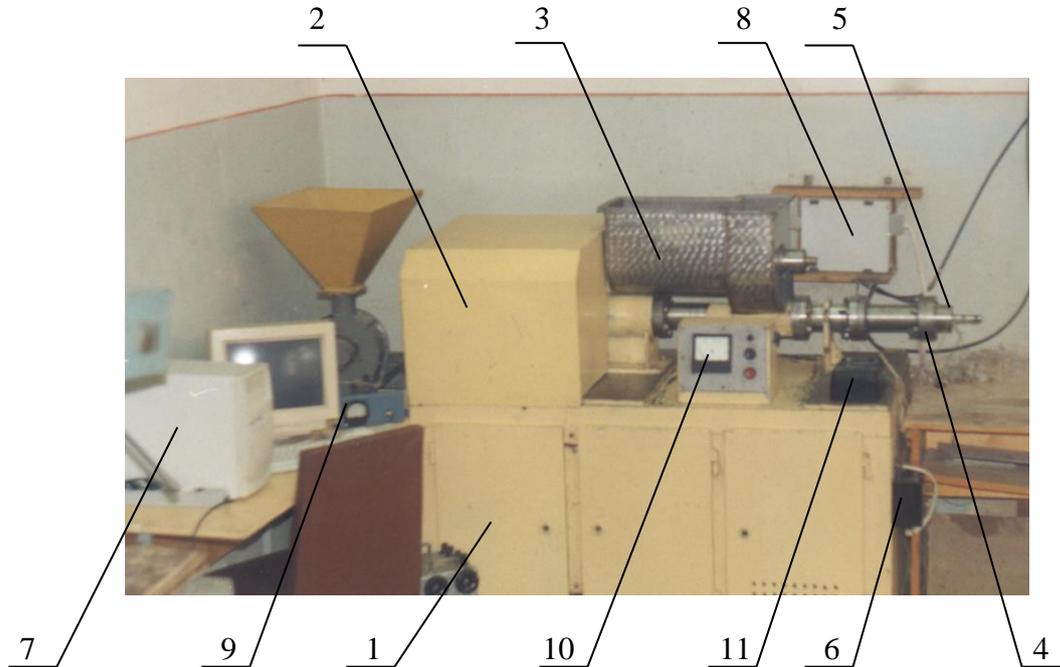


Рисунок 3.3 – Общий вид пресс-экструдера с измерительной аппаратурой:

1 – станина; 2 – редуктор; 3 – загрузочная воронка; 4 – цилиндрический корпус шнека; 5 – формующая головка; 6 – пульт управления; 7 – персональная ЭВМ; 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – тахометр; 10 – амперметр; 11 – ваттметр

Обрабатываемый материал загружается в пресс-экструдер через загрузочную воронку 3. Запуск и остановку пресс-экструдера осуществляют пультом управления 6. Регистрация показаний измеряющих датчиков фиксируется на компьютере 7, который получает сигналы от АЦП LC-212F 8. Измерение угловой скорости шнека проводится тахометром 9. Для измерения параметров электрооборудования использовался амперметр 10 и ваттметр 11 марки Д 539 (ГОСТ 8476-60) с нагрузочным трансформатором УТТ-5М (ГОСТ 51974-73).

Шнек с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами представлен на рисунке 3.4.

Технические характеристики пресс-экструдера приведены в таблице 3.1.

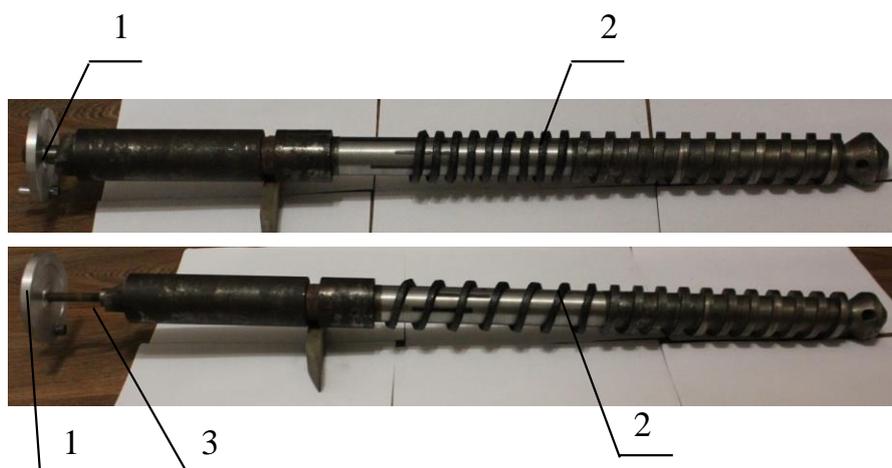


Рисунок 3.4 – Разработанная конструкция шнека: 1 – ручка; 2 – витки шнека; 3 – винт

Таблица 3.1 – Технические характеристики пресса-экструдера

Наименование показателя	Значение
Габариты, длина×ширина×высота, м	1,705×0,73×1,505
Масса, кг	480
Напряжение сети, В	380
Длина рабочей части шнека, м	0,650
Число заходов шнека	1
Внутренний диаметр корпуса, м	0,0598
Наружный диаметр шнека, м	0,047 - 0,059
Шаг винтовой лопасти шнека, м	0,024 – 0,056
Осевая толщина лопасти шнека, м	0,009
Средний диаметр насадки на конце шнека, м	0,047
Осевая протяженность насадки, м	0,05
Число фильер	1
Диаметр фильеры, м	0,014
Длина фильеры, м	0,115

В работе были использованы разработанные ранее на факультете прикладной биотехнологии и инженерии Оренбургского государственного университета прибор ПМ (рисунок 3.5) для определения физико-механических свойств экструдатов [127] и прибор для определения адгезионных и когезионных

напряжений (патент РФ №2293316), возникающих при растяжении и сжатии материалов, извлекаемых из зон экструдера [55,186].

Также в работе было использовано устройство для измерения динамического коэффициента трения, разработанное на кафедре пищевой биотехнологии Оренбургского государственного университета (заявка на патент РФ №2016129882/15 от 20.07.2016 г.). Данное устройство разработано на базе устройства для определения когезионных и адгезионных напряжений возникающих при растяжении и сжатии исследуемых материалов. В основу устройства для измерения динамического коэффициента трения заложен прибор, описанный Раутенбахом и Гольдакером [186-188], предназначенный для измерения внутреннего трения сыпучих материалов при установившемся сдвиге.

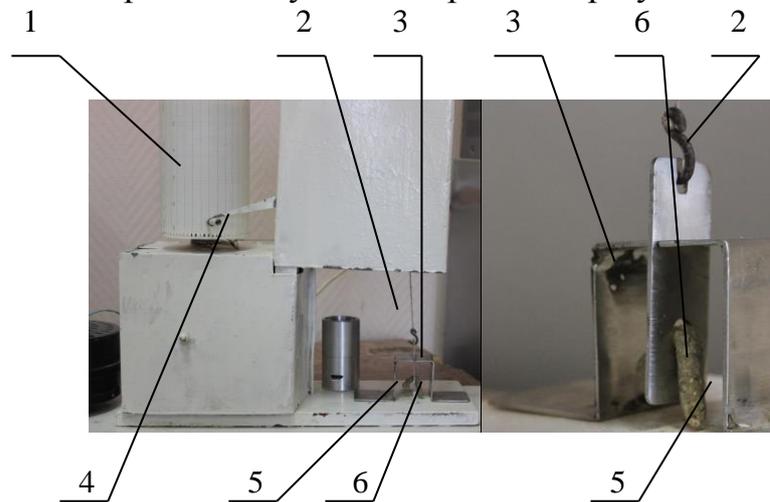


Рисунок 3.5 - Устройство для определения физико-химических свойств экструдированных изделий: 1 – измерительный цилиндр; 2 – крючок; 3 – опорная пластина; 4 – стрелка; 5 – планка с отверстием; 6 – образец экструдированного полуфабриката

Устройство для измерения динамического коэффициента трения представлено на рисунке 3.6.

Данное устройство содержит измерительный элемент 11, выполненный в виде двух параллельных пластин; нагрузитель 3, состоящий из электродвигателя 10, редуктора 8 и вариатора 9, и соединенный с ограничителями измерительного элемента; силоизмерительный механизм, соединенный с механизмом нагружения,

состоящим из активного 2 и пассивного 1 захватов. Силоизмерительный механизм представляет собой тонкую металлическую пластину 4, на которую с двух сторон наклеены тензодатчики 5, соединенные с компьютером 7 через аналого-цифровой преобразователь 6 [189].

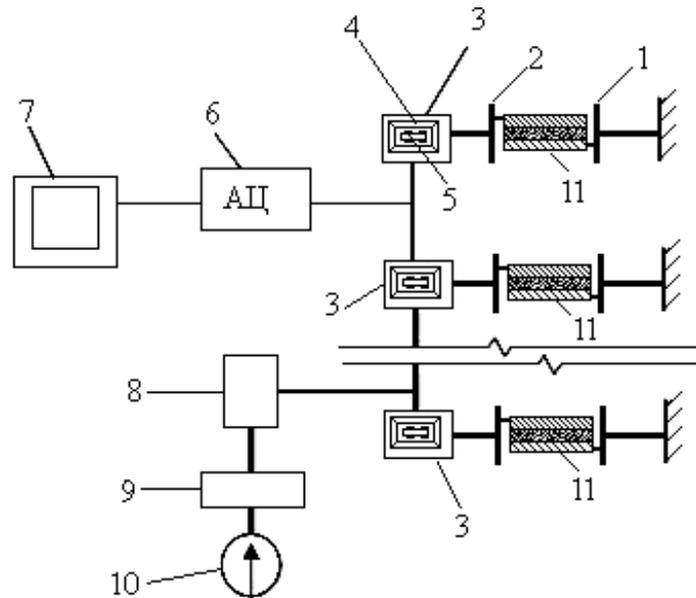


Рисунок 3.6 - Устройство для определения динамического коэффициента трения: 1 – пассивный захват; 2 – активный захват; 3 – нагрузатель; 4 – металлическая пластина; 5 – тензодатчики; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – компьютер; 8 – редуктор; 9 – вариатор; 10 – электродвигатель; 11 – измерительный механизм

Принцип работы устройства следующий. Верхняя пластина прибора для измерения сдвиговых характеристик сыпучих материалов закрепляется в активном захвате 2, нижняя пластина в пассивном захвате 1. Активный захват 2 в исходное положение подводится посредством движения нагрузателя 3 в обратном направлении [189]. Когда нагрузатель 3 приводится в движение за счет работы системы, состоящей из электродвигателя 10, вариатора 9 и редуктора 8, он равномерно тянет активный захват 2, в котором закреплена верхняя пластина измерительного механизма. При этом тензодатчики 5 передают сигнал, который регистрируется на аналого-цифровом преобразователе 6 и передается в

компьютер 7. Компьютер 7 записывает численные значения в виде графика зависимости от времени.

### **3.2 Объект исследования**

При проведении всех экспериментальных исследований, кроме определения динамического коэффициента трения, в качестве исходного сырья использовали зерновую смесь, используемую ОАО «Оренбургский комбикормовый завод», соответствующую требованиям ГОСТ 9268-2015 «Комбикорма-концентраты для крупного рогатого скота», в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль поваренная – 1%.

В качестве объектов исследования в работе использовались:

- зерновая смесь в составе: пшеница кормовая – 10%, отвечающая требованиям ГОСТ Р 54078-2010 «Пшеница кормовая. Технические условия»; овёс кормовой – 19%, отвечающий требованиям ГОСТ Р 53901-2010 «Овес кормовой. Технические условия»; ячмень кормовой – 70%, отвечающий требованиям ГОСТ Р 53900-2010 «Ячмень кормовой. Технические условия»; соль поваренная – 1%, отвечающая требованиям ГОСТ Р 51574-2000 «Соль поваренная пищевая. Технические условия»;
- кормовой продукт, экструдированный из зерновой смеси на стандартной конструкции пресс-экструдера;
- кормовой продукт, экструдированный из зерновой смеси на разработанной конструкции пресс-экструдера.

### **3.3 Методы проведения экспериментальных исследований**

#### **3.3.1 Определение параметров входящих в математическую модель**

В разрабатываемую теоретическую модель первоначально были заложены параметры, которые определяются экспериментально: динамический коэффициент трения на поверхности шнека  $f_b$ , динамический коэффициент

трения на поверхности цилиндра  $f_c$ , модуль упругости  $G$  и вязкость  $\eta$ . Модуль упругости и вязкость определяли через крутящий момент в конце зоны плавления (см. раздел 4.1). Измерения крутящих моментов проводились параллельно измерениям температуры продукта в экструдере и показателей качества продукта.

### **Определение динамического коэффициента трения**

Динамический коэффициент трения определяли на разработанном устройстве (рисунок 3.5). Для проведения эксперимента использовали три вида зерновой смеси:

- пшеница – 10%, овёс – 70%, ячмень – 19%, соль – 1%;
- пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль – 1%;
- пшеница – 70%, овёс – 19 %, ячмень – 10%, соль – 1%.

В устройстве для определения динамического коэффициента создавались условия, аналогичные условиям в экструдере.

### **Определение крутящих моментов**

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, шнековом пресс-экструдере, описание которого приведено выше (рисунок 3.2). В шнековой камере пресс-экструдера были установлены устройства для измерения крутящих моментов на расстоянии 0.08 м, 0.3 м и 0.6 м от загрузочного устройства и датчики для измерения температуры (рисунок 3.7).

Обрабатываемый материал поступает через загрузочное устройство 1 в цилиндрический корпус 2 пресс-экструдера. Устройство, установленное на расстоянии 0.08 м, измеряет крутящий момент  $M_u$  в зоне загрузки, по величине которого можно судить о виде перерабатываемого материала, с точки зрения его структурно-механических свойств.

Далее исходный материал под воздействием вращающихся витков шнека 3 перемещается в сегмент сжатия зоны плавления. Устройство, установленное на расстоянии 0.3 м, измеряет крутящий момент  $M_{nl}$  в конце зоны плавления. По величине момента в конце зоны плавления можно судить о степени расплавленности материала. После сжимания, материал поступает в сегмент

гомогенизации зоны дозирования, где происходит превращение размягченных частиц в однородный расплав. Затем материал попадает в сегмент формования зоны дозирования и продавливается через формующую головку 4.

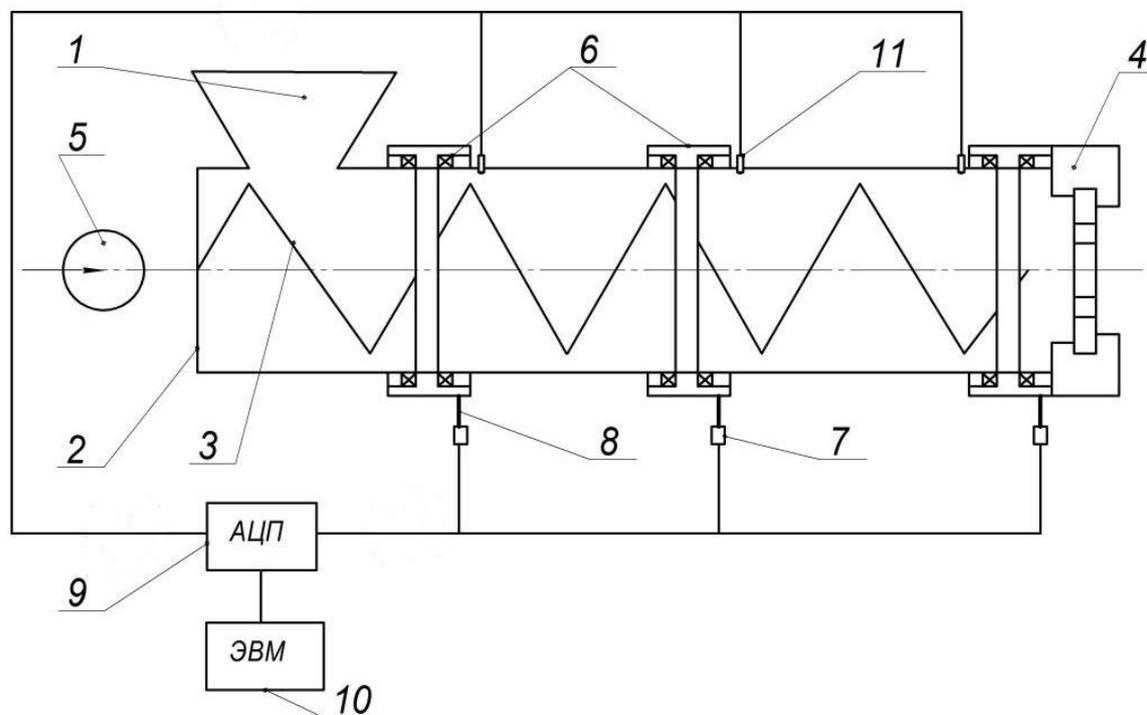


Рисунок 3.7 – Схема лабораторной установки: 1 – загрузочное устройство; 2 – корпус пресс-экструдера; 3 – шнек; 4 – формующая головка; 5 - привод прессующего шнека; 6 - цилиндрическая вставка для измерения крутящего момента; 7 – тензодатчик; 8 – металлическая пластина, с наклеенными с двух тензодатчиками; 9 – аналого-цифровой преобразователь; 10 – компьютер; 11 – датчики для измерения температуры

В результате адгезионно-когезионных взаимодействий обрабатываемого материала, крутящий момент передается от шнека 3 к измерительному устройству, расположенному в районе формующей головки 4 на расстоянии 0.6 м от загрузочного устройства 1. По степени закручивания устройства, измеряющего крутящий момент в конце зоны дозирования  $M_o$ , можно судить о плотности продукта на выходе из экструдера и, как следствие, о качестве вырабатываемой продукции.

Одновременно датчиками 11 измеряется температура перерабатываемого материала в экструдере.

Сигнал, получаемый от устройств, для измерения крутящих моментов и датчиков температуры, регистрируется на АЦП 9, затем передается в компьютер 10, преобразуясь в численные значения измеряемой величины. Данные записываются в виде массива и графика зависимости от времени.

Устройство для измерения крутящих моментов (рисунок 3.8) представляет собой цилиндрическую вставку 6 с рычажком, оказывающим воздействие на металлическую пластину 8, при закручивании вставки 6. На металлическую пластину с двух сторон наклеены тензодатчики 7 [164].

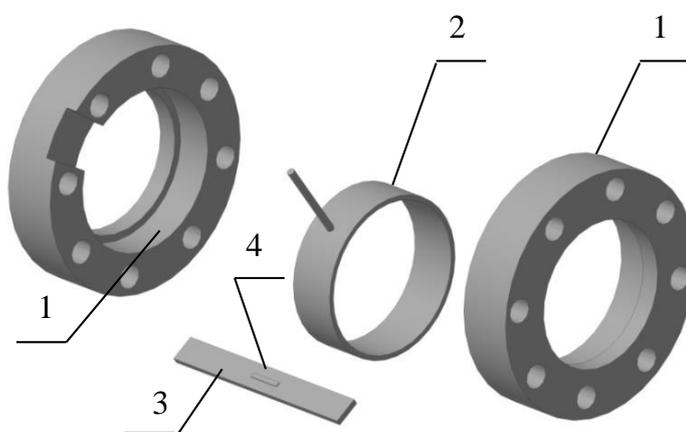


Рисунок 3.8 – Устройство для измерения крутящих моментов: 1 – фланец; 2 – цилиндрическая вставка с рычагом; 3 – пластина; 4 - тензодатчик

### 3.3.2 Методы определения параметров технологического процесса и физико-химических параметров перерабатываемого материала

Для определения качества вырабатываемого кормового продукта был проведен ряд экспериментов. В процессе экспериментальных исследований было изучено преобразование исходной зерновой смеси в составе: в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70% и соль поваренная – 1%, в каждой зоне с точки зрения плотности и полного напряжения, возникающего в перерабатываемом материале.

Количество повторностей рассчитывали по критерию Стьюдента с целью достижения доверительного интервала 0,5. По расчетам выявлено, что количество повторностей равняется пяти.

Плотность перерабатываемого материала по зонам экструдера определяли следующим образом: после выхода экструдера на режим, останавливали его, выключали привод, разбирали экструдер на части и исследовали материал, находящийся в каждой зоне. Плотность определяли в соответствии с ГОСТ 23513-79 «Брикеты и гранулы кормовые. Технические условия».

Полное напряжение в перерабатываемом материале в канале шнека экструдера под действием внешних сил определяли по формуле:

$$p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение, кПа

$\tau$  – касательное напряжение, кПа

$$\text{где} \quad \tau = \frac{F}{S}, \quad (3.2)$$

где  $F$  – усилие на срез;

$S$  – площадь поперечного сечения экструдата.

Нормальное напряжение определяли на устройстве для определения адгезионных и когезионных напряжений, возникающих при растяжении и сжатии исследуемых материалов (патент РФ №2293316). Касательное напряжение определяли на приборе ПМ для определения физико-химических свойств экструдированных изделий (рисунок 3.5).

Повторность опыта осуществляется не менее 3 раз, при этом окончательным результатом является среднее арифметическое значение (грубые промахи выбраковываем).

Затраты энергии на осуществление экструдирования определяли с помощью ваттметра. Удельные затраты энергии рассчитывали по формуле:

$$uz\text{Э} = \frac{\sum N_i}{Q} \quad (3.3)$$

где  $N_i$  - измеряемая мощность, Вт;

$Q$  - производительность пресс-экструдера, кг/ч.

Планирование экспериментов осуществлялось с помощью композиционного ортогонального плана полнофакторного эксперимента ПФЭ  $2^3$  [174].

### 3.3.3 Методы исследования качества и химического состава перерабатываемого материала и готового продукта

Качество экструдированного кормового продукта из исходной зерновой смеси в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль поваренная – 1% оценивали в соответствии с ГОСТ Р 51899-2002 «Корма гранулированные. Общие технические условия».

*Крошимость* экструдированного кормового продукта (рисунок 3.9а) определяли в соответствии с ГОСТ 28497-90 «Комбикорма, сырье гранулированные. Методы определения крошимости» на приборе ППГ-2, представленном на рисунке 3.9б.



а

б

Рисунок 3.9 – Устройство для определения крошимости готовых экструдированных изделий ППГ-2

Крошимость рассчитывали с помощью формулы:

$$K = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% , \quad (3.4)$$

где  $m_1$  - масса экструдата до испытаний, г;

$m_2$  - масса экструдата после испытаний, г.

Окончательным результатом испытания считалось среднее арифметическое значение результатов двух параллельных определений.

*Прочность* гранул определяли на устройстве для контроля прочности ИПМ-1 (аналог прибора Строгонова).

Рассчитывали прочность по формуле:

$$P = \frac{m}{S}, \text{ где } S = \pi \cdot \frac{D^2}{4}, \quad (3.5)$$

где  $D$  - диаметр гранулы экструдированного материала, мм.

*Влажность* готового продукта определяли по ГОСТ 13496.3-92.

*Содержание клетчатки* определяли по Кюршнеру и Ганеке,

*Содержание белка* определяли по методу Кьельдаля ГОСТ 10846-91.

*Содержание сухого вещества* определяли в соответствии с ГОСТ 31640-2012 «Методы определения содержания сухого вещества».

*Количество сырого жира* определяли в соответствии с ГОСТ 13496.15-97. «Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания сырого жира».

*Содержание сырой золы* определяли в соответствии с ГОСТ 26226-95 «Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения сырой золы».

*Аминокислотный состав* определяли в соответствии с ГОСТ 32195-2013. Определение аминокислотного состава кормового продукта проводили на аминокислотном анализаторе ААА Т 339.

### 3.3.4 Методика оценки продуктивного действия и энергетической ценности экструдированных кормовых продуктов

Определение энергетической ценности кормовых продуктов, экструдированных на разработанной и стандартной конструкции пресс-экструдера из исходной зерновой смеси в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль поваренная – 1%, проводили методом косвенной оценки уровня обменной энергии, не предполагающим проведение прямых опытов на животных (Клейменов Н.И., Баканов В.Н., Калашников А.П., и тд. 1985).

*Содержание обменной энергии* в сухом веществе было определено с помощью формулы Аксельсона:

$$OE = 0,73 \cdot \frac{VE}{CB} \cdot (CB - 1,05 \cdot cK), \text{ МДж} \quad (3.6)$$

где *OE* – обменная энергия, МДж;

*VE* - валовая энергия, МДж;

*CB* - количество сухого вещества, кг;

*cK* – содержание сырой клетчатки, кг.

Валовую энергию рассчитывали по формуле:

$$VE = 23,95 \cdot cП + 34,14 \cdot cЖ + 20,05 \cdot cK + 17,46 \cdot cБЭВ, \text{ МДж} \quad (3.7)$$

где *cП* - количество сырого протеина, кг;

*cЖ* - количество сырого жира, кг;

*cK* - количество сырой клетчатки, кг;

*cБЭВ* - безазотистые экстрактивные вещества, кг.

Безазотистые экстрактивные вещества определяли по формуле:

$$cБЭВ = СВ - cЗ - cП - cК, \text{ кг} \quad (3.8)$$

где  $СВ$  - количество сухого вещества, кг;

$cЗ$  - количество сырой золы, кг;

Концентрацию обменной энергии определяли по формуле:

$$КОЭ = ОЭ / СВ, \text{ МДж/кг СВ} \quad (3.9)$$

Количество обменной энергии, которое затрачивается организмом животного на производство продукции, определялось по формуле:

$$ОЭ_з = ОЭ - ОЭ_{\text{поддерж}}, \quad (3.10)$$

где  $ОЭ$  - общее количество обменной энергии, МДж;

$ОЭ_{\text{поддерж}}$  - обменная энергия поддержания, МДж.

Содержание общего количества обменной энергии в рационе устанавливалось по формуле 3.6. Определение количества обменной энергии, необходимой на поддержание жизни, использовали формулы, предложенные в схеме АСР (1964,1968):

$$ОЭ_{\text{поддерж}} = \frac{ЧЭ_{\text{поддерж}}}{0,55 + 0,016 \cdot КОЭ}, \text{ МДж} \quad (3.11)$$

где  $ЧЭ_{\text{поддерж}}$  - чистая энергия поддержания, МДж;

Количество чистой энергии, необходимой на поддержание жизни, определялось по формуле:

$$ЧЭ_{\text{поддерж}} = 5,67 + 0,061 \cdot m, \text{ МДж} \quad (3.12)$$

где  $m$  - живая масса, кг.

Величину чистой энергии прироста определяли по формуле Н.Г. Григорьева и др. (1989):

$$ЧЭ = 0,035 \cdot КОЭ \cdot ОЭ_{прод}, \text{МДж} \quad (3.13)$$

### 3.3.5 Методика исследования перевариваемости кормов

Исследования выполнены в условиях фермерского хозяйства ООО МТС «Красногоры» Саракташского района Оренбургской области в марте-апреле 2016 года с использованием материально-технической базы Испытательного центра ВНИИМС (ат. аккред. РоссRu 000121 ПФ59).

Исследования перевариваемости «in situ» осуществляли на молодняке крупного рогатого скота. Для этого было отобрано 3 бычка, с установленными по методу А.А. Алиева (1997) фистулами рубца. Корма закладывали в нейлоновые мешочки, а после на леске вводили в организм животных через фистулу (рисунок 3.10). Опыт проводили в трех повторностях.



Рисунок 3.10 – Исследования перевариваемости сухой массы корма на молодняке крупного рогатого скота с фистулой в рубце

В эксперименте оценивали перевариваемость сухой массы исходной зерновой смеси в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль

поваренная – 1% и экструдированных из данной смеси кормовых продуктов путем экспозиции в течение 24 часов.

При проведении исследований перевариваемости «in situ» бычкам вводили сначала исходную неэкструдированную зерновую смесь. Спустя 24 часа изымали мешочки с неэкструдированной зерновой смесью и оценивали ее перевариваемость. Затем, спустя некоторое время по той же методике, вводили кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера и кормовой продукт экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера.

Перевариваемость сухой массы корма определяли как разность между первоначальным и конечным брутто весом. Далее рассчитывали процентное отношение перевариваемости сухой массы корма.

### **3.3.6 Методика проведения научно-хозяйственного опыта**

Для исследования влияния экструдированного кормового продукта на повышение энергетической и протеиновой питательности рационов, и, как следствие, повышение мясной продуктивности, был поставлен научно-хозяйственный опыт на молодняке крупного рогатого скота. Для проведения опыта было отобрано 30 десятимесячных бычков красной степной породы (рисунок 3.11). Далее, по методу пар – аналогов сформировали три группы. Научно-хозяйственный опыт проводили в течение 60 дней. Опытные животные содержались на привязи.

Животные контрольной группы получали многокомпонентный рацион. Животным 1 и 2 опытных групп заменяли 30 % рациона соответственно на кормовой продукт, экструдированный из исходной зерновой смеси на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера (таблица 3.2).

Рост и развитие молодняка крупного рогатого скота контролировали индивидуальным ежемесячным взвешиванием утром до кормления. Полученные

данные являлись основой для расчета абсолютного и среднесуточного прироста подопытных бычков.



Рисунок 3.11 – Проведение научно-хозяйственного опыта

Абсолютный прирост живой массы был определен с помощью формулы:

$$A = W_2 - W_1, \quad (3.14)$$

где  $A$  – абсолютный прирост, кг;

$W_2 - W_1$  - начальная и конечная живая масса, кг.

Таблица 3.2 – Схема научно-хозяйственного опыта

Группа	Количество животных в группе	Период опыта, дней	Характер кормления
Контрольная	10	60	ОР
1 опытная	10	60	ОР <sub>1</sub>
2 опытная	10	60	ОР <sub>2</sub>

Примечание: ОР – основной рацион;

ОР<sub>1</sub> – 30% заменено на кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера;

ОР<sub>2</sub> – 30% заменено на кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера.

Среднесуточный прирост живой массы был рассчитан по формуле:

$$A_{cp/cym} = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}, \quad (3.15)$$

где  $t_2 - t_1$  - время от первого до второго взвешивания, мес.

### **3.4 Обработка экспериментальных данных**

Количество повторностей проведения экспериментальных исследований определялось в зависимости от сложности и точности применяемых методов. Обработку экспериментальных данных проводили на разработанном программном средстве «Обработка результатов многофакторного эксперимента на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ 2<sup>3</sup>», зарегистрированном в фонде алгоритмов и программ Оренбургского государственного университета.

Технические параметры необходимые для работы с программным средством: персональный компьютер с совместимостью IBM PC, Pentium II-233 и выше, операционная система компьютера должна быть оснащена программным средством Microsoft Excel.

### **Выводы по третьей главе**

1. Предложена последовательность применения разработанной методики для оценки реологических, структурно-механических, физико-химических и качественных характеристик процесса экструзии и влияния экструдированного кормового продукта на мясную продуктивность скота.

2. Разработано устройство для определения динамического коэффициента трения.

3. Разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию конструкция одношнекового пресс-экструдера для производства экструдированных кормовых продуктов, с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека, на которую получен патент РФ.

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭКСТРУДИРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ПРОТЕКАНИЯ И НА КАЧЕСТВО ГОТОВОГО КОРМОВОГО ПРОДУКТА**

### **4.1 Исследование зависимости структурно-механических и реологических параметров экструдруемого материала от параметров технологического процесса**

С целью изучения зависимости структурно-механических и реологических параметров экструдруемого материала от параметров технологического процесса была проведена серия экспериментов, при которых были изучены зависимости динамического коэффициента трения, модуля упругости и вязкости от параметров экструдера и перерабатываемого материала.

В работе были использованы разработанные ранее математические методы оптимизации биотехнологических объектов на основе математического планирования экспериментов, которые были апробированы при определении динамического коэффициента трения при экструдировании, на поверхности шнека и на поверхности цилиндра [189].

Изменение угла наклона витков шнека и расстояния между ними целесообразно выразить в виде отношения шага винтовой лопасти шнека к ее наружному диаметру ( $L/D$ ). В качестве параметров, влияющих на динамические коэффициенты трения, были выбраны: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ( $L/D$ ), крутящий момент в конце зоны загрузки ( $M_u$ ) и температура сырья на входе в экструдер ( $t$ ). После серии экспериментов был разработан план полного факторного эксперимента ПФЭ<sup>3</sup>, с включением ключевых точек с целью получения уравнений второго порядка. Значения исследованных факторов в плане представлены в условных единицах. Ключевые

точки плана эксперимента в условных единицах и натуральных значениях представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения исследованных факторов

Отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру			
Условные единицы, L/D	-1	0	1
Натуральные значения, L/D'	0,4	0,8	1,2
Крутящий момент в конце зоны загрузки			
Условные единицы, $M_u$	-1	0	1
Натуральные значения, $M_u'$ , Н·м	5,4	4,6	3,5
Температура сырья на входе в экструдер			
Условные единицы, t	-1	0	1
Натуральные значения, t', °С	20	40	60

В связи с отсутствием возможности измерения динамического коэффициента трения непосредственно в экструдере, его измерения проводили на устройстве, представленном на рисунке 3.7. При этом предварительно установили:

- зависимость скорости движения твердого материала  $v_{тв.м.}$  от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$ , которая описывается формулой [181]:

$$v_{тв.м.} = \frac{\rho W H v_b}{\cos \varphi} \cong \gamma \pi^2 D^2 H \omega_s \tan \varphi = \gamma \pi^2 D^2 H \omega_s L / D, \quad (4.1)$$

где  $\gamma$  - объемный вес перерабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  - внешний диаметр шнека, м;

$W$  - расстояние между витками шнека, м;

$H$  - глубина канала шнека, м;

$v_b$  - скорость цилиндра, м/с;

$\varphi$  - угол наклона витков шнека;

$\omega_s$  - частота вращения шнека, рад/с<sup>-1</sup>

- зависимость давления  $P$  от крутящего момента в конце зоны загрузки  $M_u$ , рассчитываем по формуле (2.21).

Затем заменили параметры, влияющие на динамический коэффициент трения на параметры, непосредственно связанные с ними, а именно: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру – на скорость движения твердого материала, крутящий момент в конце зоны загрузки – на давление в конце зоны загрузки, значения которых представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения исследованных факторов

Скорость движения твердого материала			
Условные единицы, $v_{тв.м.}$	-1	0	1
Натуральные значения, $v_{тв.м.}'$ , м/с	1,4	0,89	0,26
Давление в конце зоны загрузки			
Условные единицы, Р	-1	0	1
Натуральные значения, Р', кПа	111,7	109,8	106,8
Температура сырья на входе в экструдер			
Условные единицы, t	-1	0	1
Натуральные значения, t', °С	20	40	60

План эксперимента ПФЭ<sup>3</sup> в условных единицах представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – План эксперимента

№ опыта	$v_{тв.м.}$	Р	t
1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1
3	1	-1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	-1	1	1
7	1	-1	1
8	1	1	1
9	-1	0	0
10	1	0	0
11	0	-1	0
12	0	1	0
13	0	0	-1
14	0	0	1
15	0	0	0

Для обеспечения требуемой точности все опыты проводились в трех повторностях. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты эксперимента

№ опыта	Динамический коэффициент трения, $f_b$		
	Повторность		
	№ 1	№ 2	№ 3
1	0,32	0,325	0,33
2	0,27	0,28	0,285
3	0,325	0,33	0,315
4	0,274	0,275	0,271
5	0,358	0,351	0,357
6	0,28	0,34	0,32
7	0,342	0,36	0,354
8	0,311	0,306	0,298
9	0,307	0,304	0,2965
10	0,307	0,305	0,295
11	0,315	0,31	0,33
12	0,273	0,28	0,29
13	0,273	0,305	0,29
14	0,2875	0,315	0,329
15	0,22	0,3	0,29

Динамический коэффициент трения на поверхности шнека рассчитывается по формуле:

$$f_b = f_s \cdot k_1, \quad (4.2)$$

где  $f_s$  - динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра;

$k_1$  - коэффициент, зависящий от материала шнека и цилиндра.

Для наиболее распространенного случая принимаем  $k_1 = 1$ , отсюда следует, что  $f_b = f_s$ .

По результатам эксперимента было получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость динамического коэффициента трения  $f_b$  от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру, крутящего момента в конце зоны загрузки и температуры сырья на входе в экструдер:

$$f_b = 0,307 - 0,021 \cdot M_u - 0,014 \cdot t - 0,0002 \cdot L/D \cdot M_u \cdot t + 0,0138 \cdot L/D^2 + 0,0119 \cdot M_u^2 + 0,0121 \cdot t^2, \quad (4.3)$$

где  $L/D, M_u, t$  - соответственно отношение винтовой лопасти шнека к наружному диаметру, крутящий момент в конце зоны загрузки и температура сырья на входе в экструдер представлены в условных единицах.

Для перевода натуральных величин в условные единицы приведены уравнения:

$$\begin{aligned} L/D &= 2,5 \cdot L/D' - 2 \\ M_u &= -0,4223 \cdot M'_u + 1,5764 \\ t &= 0,05 \cdot t' - 2. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Величины со штрихом натуральные.

Измерение крутящего момента перерабатываемого материала при помощи цилиндрических насадок на корпус экструдера позволяет рассчитать возникающее напряжение и скорость сдвига по формулам:

$$\tau = M_n / (2\pi L_1 R_1^2); \quad \dot{\gamma} = \omega_1 R_1 / a, \quad (4.5)$$

где  $M_n$  - крутящий момент, Н·м;

$L_1$  - длина зазора, м;

$\omega_1$  - частота вращения ротора, с<sup>-1</sup>;

$R_1$  - расстояние до зазора, м;

$a$  - ширина зазора, м.

В экструдере при установившемся режиме скорость деформации постоянна, учитывая формулу (2.52) и что  $\dot{\gamma} = \frac{\gamma}{\Delta t}$ , где  $\Delta t = t - t_0 = t$ , т.к.  $t_0 = 0$ , получим:

$$\tau = \dot{\gamma} \cdot \eta \left( 1 - e^{-\frac{G\gamma}{\dot{\gamma}\eta}} \right), \quad (4.6)$$

Таким образом, исходя из формулы (4.6), наблюдается четкая связь между скоростью сдвига и касательным напряжением.

В выражении (4.6)  $\dot{\gamma} = const$ , а  $\eta, G$  определяются по зависимостям касательного напряжения от сдвига.

Например, на рисунке 4.1 представлена зависимость касательного напряжения от скорости сдвига при крутящем моменте в конце зоны плавления  $M_{nl} = 11,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , температуре перерабатываемого материала  $t_1 = 105^\circ\text{C}$  и частоте вращения ротора  $\omega_1 = 120 \text{ об/мин}$ , полученная при постоянной скорости сдвига  $\dot{\gamma} = 743,75 \text{ с}^{-1}$ .

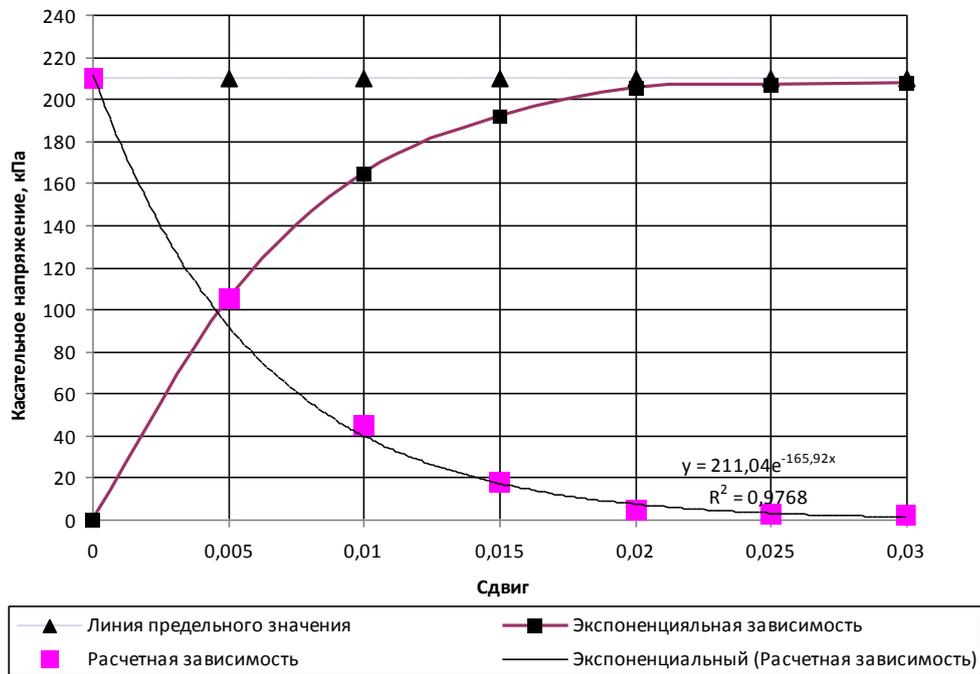


Рисунок 4.1 – Зависимость касательного напряжения от сдвига при крутящем моменте в конце зоны плавления  $M_{nl} = 11,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , температуре перерабатываемого материала  $t_1 = 105^\circ\text{C}$  и частоте вращения ротора  $\omega_1 = 120 \text{ об/мин}$ .

Из графика, представленного на рисунке 4.1 видно, что предельное (максимально возможное) напряжение находится в независимости от величины сдвига,  $\sigma_{II} = 211,04 \text{ кПа}$ . Исходя из экспоненциальной зависимости  $A = 210,04$ ;  $B$

=1,6592. Тогда, с учётом того, что реологические свойства перерабатываемого материала описываются по формуле (4.6) получим:

- вязкость при продольном течении:

$$\eta = \frac{A}{\dot{\gamma}} = \frac{211,04}{743,75} = 0,284 \text{ кПа} \cdot \text{с}, \quad (4.7)$$

- модуль упругости при поперечной деформации:

$$G = B \cdot \eta \cdot \dot{\gamma} = 1,6592 \cdot 743,75 \cdot 0,284 = 350,5 \text{ кПа}, \quad (4.8)$$

В качестве параметров, влияющих на реологические свойства перерабатываемого материала, были выбраны: крутящий момент в конце зоны плавления ( $M_{nl}$ ), частота вращения шнека  $\omega_3$  и температура перерабатываемого материала ( $t_1$ ), меняющиеся в пределах:

$$\begin{aligned} 5,6 \text{ Н} \cdot \text{м} &\leq M_{nl} \leq 16,8 \text{ Н} \cdot \text{м}; \\ 60 \text{ об / мин} &\leq \omega_3 \leq 180 \text{ об / мин}; \\ 60^\circ \text{C} &\leq t_1 \leq 120^\circ \text{C}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Для установления зависимости реологических характеристик перерабатываемого материала при экструдировании от величины крутящего момента в конце зоны плавления, температуры перерабатываемого материала и угловой скорости вращения шнека был составлен трехфакторный эксперимент по композиционному ортогональному плану ПФЭ  $2^3$ . На основании результатов эксперимента получены уравнения регрессии второго порядка.

Исследования были выполнены в трех повторностях для каждой точки эксперимента.

Уравнения регрессии имеют вид:

$$\begin{aligned} \eta &= 0,283 + 0,0903 \cdot M_{nl} - 0,00442 \cdot \omega_3 - 0,00182 \cdot t_1 - \\ &- 0,0045 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 - 0,006 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 \cdot t_1 - 0,0068 \cdot M_{nl}^2 \\ G &= 342,8 + 19,053 \cdot M_{nl} + 8,507 \cdot \omega_3 + 4 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 + \\ &+ 8 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 \cdot t_1 + 7,83 \cdot M_{nl}^2 - 8,756 \cdot t_1^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

где величины  $M_{nl}$ ,  $\omega_3$ ,  $t_1$  представлены в условных единицах.

Для перевода натуральных величин в условные единицы приведены уравнения:

$$\begin{aligned} M_{nl} &= -0,1781 \cdot M'_{nl} + 2,044 \\ \omega_3 &= 0,0167 \cdot \omega'_3 - 2 \\ t_1 &= 0,0333 \cdot t'_1 - 3 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Величины со штрихом натуральные.

Составленные уравнения зависимости реологических характеристик от технологических параметров процесса экструдирования позволяют наиболее полно учесть особенности перерабатываемого материала в разработанной математической модели.

#### 4.2 Анализ соответствия расчетных данных экспериментальным

Для анализа соответствия расчетных данных экспериментальным, провели серию экспериментов, сопровождающихся измерением крутящих моментов в ключевых точках: в конце зоны загрузки (на расстоянии 0,08 м от загрузочного устройства), в конце зоны плавления (на расстоянии 0,3 м от загрузочного устройства) и в зоне дозирования (на расстоянии 0,6 м от загрузочного устройства). При проведении экспериментов, за основной параметр, определяющий технологический режим, принимали отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$ . Использовались следующие технологические режимы: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру 0,4, 0,8 и 1,2, температура сырья на входе в экструдер 40<sup>0</sup>С, частота вращения шнека 120 об/мин.

Корректность соответствия разработанной математической модели обеспечивалась идентичностью исходных данных в проведенных и численных экспериментах.

Экспериментальные исследования проводили на пресс-экструдере с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека (рисунок 3.2). По результатам экспериментов строились графики, с одновременным нанесением расчетных (в соответствии с разработанной теоретической моделью) и экспериментальных данных.

На графике 4.2 приведены кривые крутящих моментов при производстве экструдированных кормовых продуктов. Кривые, построенные основными линиями, отражают экспериментальные данные, а пунктирными - полученные при тех же условиях с помощью математической модели.

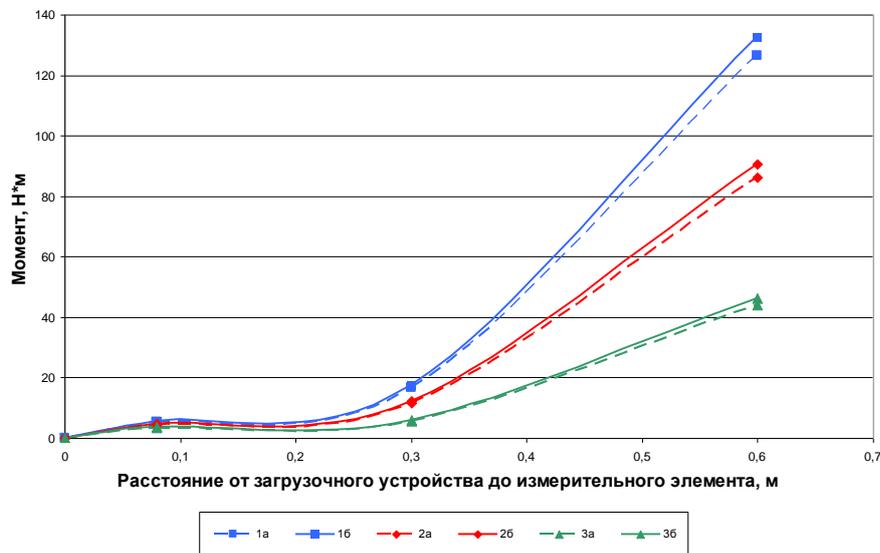


Рисунок 4.2 - Изменение крутящих моментов в пресс-экструдере при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру 0,4 0,8, 1,2, частоте вращения шнека 120 об/мин и температуре сырья на входе в экструдер 40 °С: 1а, 1б – величина крутящего момента при L/D=0,4; 2а,2б – величина крутящего момента при L/D=0,8; 3а,3б – величина крутящего момента при L/D=1,2

Сравнивая экспериментальные данные с результатами моделирования, можно сделать следующий вывод: экспериментальные значения крутящих моментов в конце зон загрузки  $M_u$ , плавления  $M_{пл}$  и дозирования  $M_o$  отличаются

от расчетных в каждой точке не более чем на 3-5 %, что удовлетворяет требуемой точности моделирования.

Из чего следует сделать вывод, что теоретические расчеты подтверждены экспериментально, а разработанная математическая модель достаточно хорошо описывает реальный процесс экструзии.

#### **4.3 Исследование зависимости технологических и физико-химических параметров от параметров исходного сырья**

Для определения технологических и физико-химических параметров перерабатываемого материала были проведены экспериментальные исследования по переработке исходного зернового сырья в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль поваренная – 1% с получением конечного кормового продукта [55]. Экспериментальные исследования проводились на пресс-экструдере со стандартной конструкцией шнека при рекомендуемых режимах и разработанной конструкцией шнека с получением оптимальных режимов экструдирования.

Экспериментальные исследования проводились по методике, указанной в пункте 3.3.2. Шнековая камера пресс-экструдера была условно разделена на три зоны: зона загрузки, зона плавления (включающая сегменты транспортирования и сжатия) и зона дозирования (включающая сегменты гомогенизации и формования), было изучено преобразование материала в каждой зоне с точки зрения плотности материала  $\rho$  и полного напряжения  $p$ , возникающего в перерабатываемом материале. Условием окончания зоны загрузки являлось полное заполнение межвинтового пространства материалом. Окончание сегмента транспортирования зоны плавления определяли по наличию характерных изменений в продукте в сторону приобретения однородной структуры. Конец сегмента сжатия зоны плавления определяли по полному преобразованию материала в упруго-вязко-пластичный. Конец сегмента гомогенизации зоны

дозирования определяли по достижению полной однородности перерабатываемого материала.

Результаты экспериментальных исследований переработки зернового сырья, с получением конечного кормового продукта на пресс-экструдере со стандартной конструкцией шнека представлены на графиках 4.3 и 4.4.

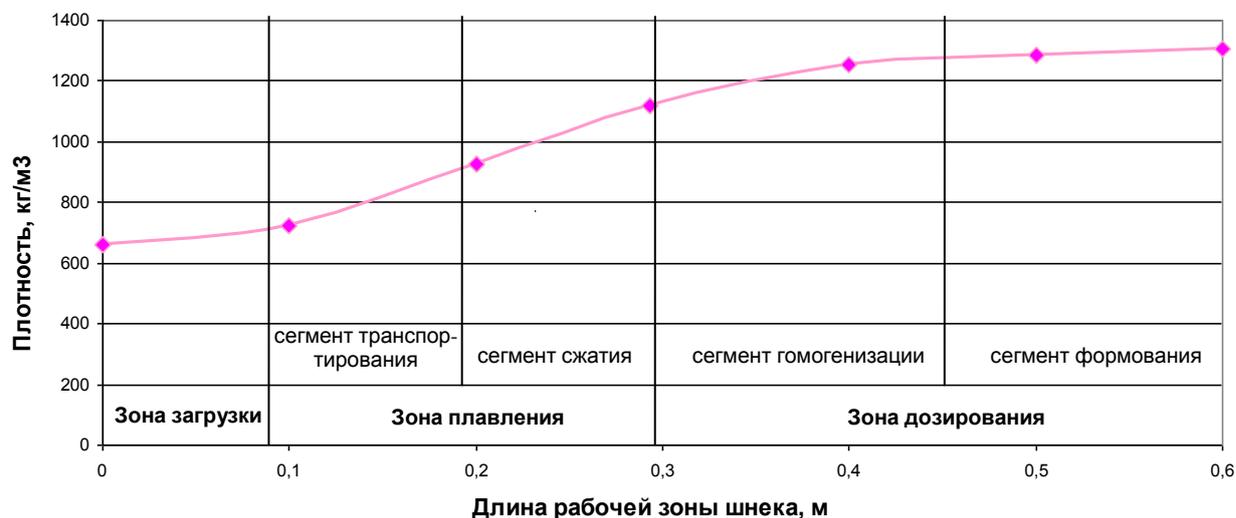


Рисунок 4.3 - Плотность перерабатываемого материала в зонах шнековой камеры экструдера, кг/м<sup>3</sup>

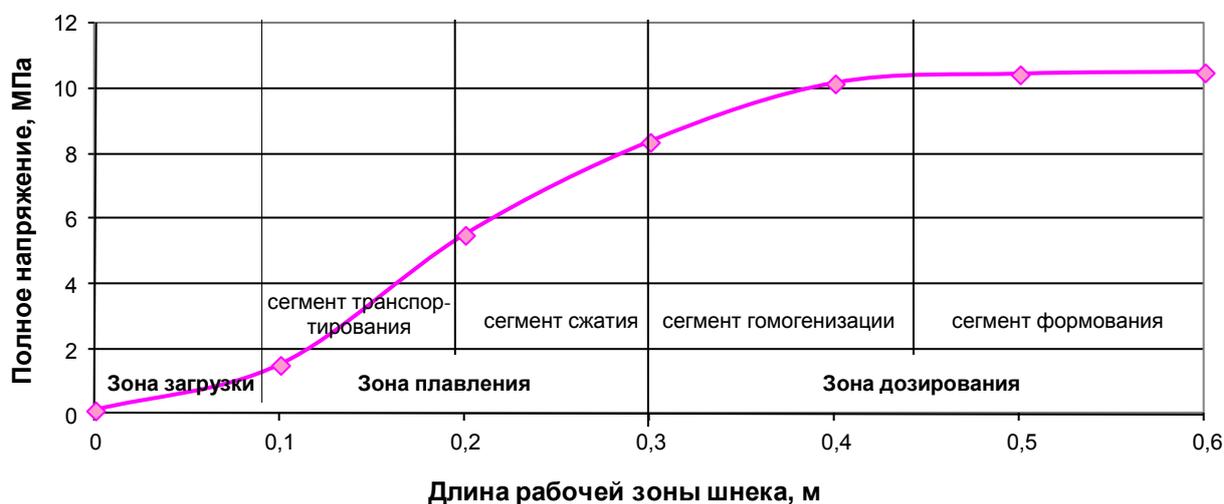


Рисунок 4.4 – Полное напряжение, возникающее в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры экструдера, МПа

Из графика, представленного на рисунке 4.3 мы видим, что результаты свидетельствуют о недостаточном уплотнении материала в сегменте сжатия зоны

плавления  $1100 \text{ кг/м}^3$  по сравнению с  $1300 \text{ кг/м}^3$ , которые получаем на выходе из экструдера. А также о недостаточной плотности материала в сегменте формования зоны дозирования  $1300 \text{ кг/м}^3$ , по сравнению с  $1400 \text{ кг/м}^3$ , достигаемых на гидравлических прессах, при использовании аналогичного сырья. Это не позволяет получать кормовой продукт на выходе из экструдера высокого качества, соответствующие техническим требованиям ГОСТ Р 51899-2002 «Корма гранулированные. Общие технические условия» из-за недостаточно прочной структуры.

Вместе с тем, следует отметить (рисунок 4.4), что в сегменте сжатия зоны плавления происходит возрастание полного напряжения в перерабатываемом материале до  $8,4 \text{ МПа}$ , что отрицательно влияет на дальнейшее прохождение материала вдоль шнека экструдера и приводит к большим энергозатратам.

В сегменте гомогенизации зоны дозирования наблюдается дальнейшее возрастание полного напряжения до  $10,3 \text{ МПа}$  и в сегменте формования зоны дозирования полное напряжение составляет до  $10,5 \text{ МПа}$ , что так же отрицательно влияет на формование экструдруемых изделий. Полученные данные объясняются неэффективной работой пресс-экструдера при использовании стандартной конструкции шнековой камеры.

В связи с вышесказанным, был сделан вывод о необходимости проведения экспериментальных исследований на разработанной конструкции пресс-экструдера, дополненной шнеком с возможностью регулирования скорости подачи материала в сегмент сжатия зоны плавления, за счет оперативного изменения параметров шнека.

Для исследования изменения плотности и полного напряжения в перерабатываемом материале в зависимости от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ( $L/D$ ) и влажности перерабатываемого материала использовали так же исходную зерновую смесь. На основе предварительных экспериментальных данных был составлен и реализован план трехфакторного эксперимента [65] с целью определения влияния влажности и отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру, на плотность перерабатываемого

материала и полное напряжение в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры экструдера. При этом влажность меняли от 16% до 20%,  $L/D$  – от 0,4 до 1,2. Толщина лопасти шнека составляла 7 мм, внешний диаметр винтовой линии – 59 мм и длина прессующей части 650 мм.

На основании результатов эксперимента, с помощью программного средства, разработанного на факультете прикладной биотехнологии и инженерии ОГУ, получены уравнения регрессии второго порядка и построены плоскости отклика.

Уравнения регрессии:

- плотность обрабатываемого материала в зонах шнековой камеры экструдера:

$$\rho = 1303,97 - 11,48 \cdot W - 15,30 \cdot L/D + 28,3 \cdot W \cdot L/D + 11,90 \cdot W^2 + 27,24 \cdot L/D^2, \quad (4.12)$$

- полное напряжение, возникающее в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры экструдера:

$$p = 8,69 - 0,17 \cdot W + 0,34 \cdot L/D - 0,79 \cdot W \cdot L/D - 0,34 \cdot L/D^2, \quad (4.13)$$

где:  $W$  – влажность обрабатываемого материала;

$L/D$  – отношение шага винтовой лопасти шнека к ее наружному диаметру.

Величины  $W$  и  $L/D$  в условных единицах.

Для перевода натуральных величин в условные единицы можно воспользоваться следующими уравнениями:

$$W = 0,5 \cdot W' - 9; \quad (4.14)$$

$$L/D = 2,5 \cdot L/D' - 2, \quad (4.15)$$

Величины со штрихом натуральные,

Плоскости отклика [191,192], построенные на основании полученных уравнений регрессии, представлены соответственно на рисунках 4.5 и 4.6.

Из рисунка 4.5 мы видим, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека, к ее наружному диаметру ( $L/D$ ) в зоне загрузки, сегментах транспортирования и сжатия зоны плавления можно значительно увеличить плотность материала. Так же наблюдается увеличение плотности материала в сегменте формирования зоны дозирования до величины  $1400 \text{ кг/м}^3$ , сопоставимой с

достигаемой на гидравлических прессах, при использовании аналогичного сырья [193,194].

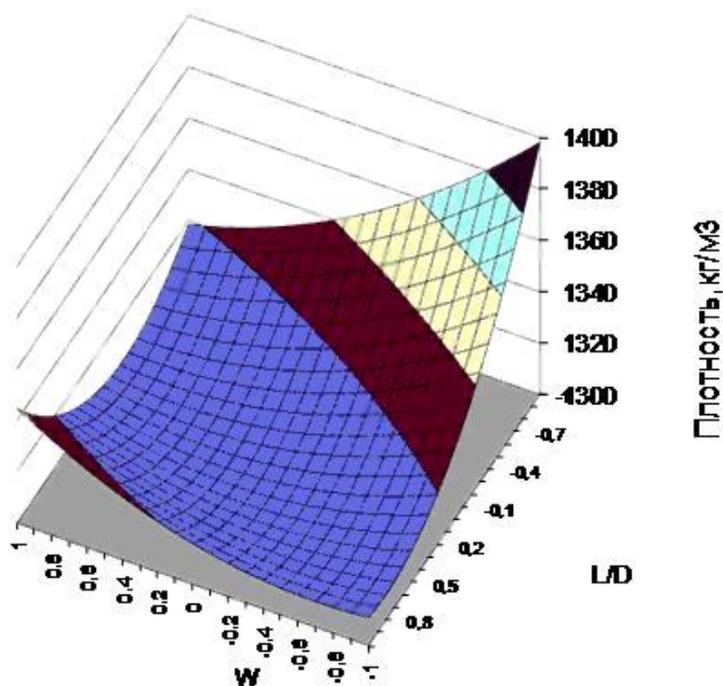


Рисунок 4.5 – Зависимость плотности материала в зонах шнековой камеры экструдера от влажности и отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру

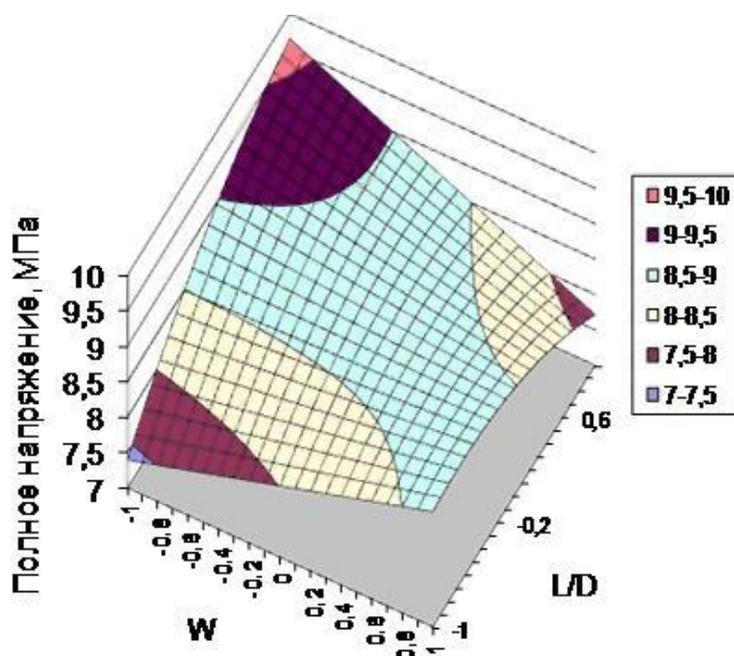


Рисунок 4.6 – Зависимость полного напряжения в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры экструдера от влажности и отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру

Из рисунка 4.6 видно, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека к ее наружному диаметру ( $L/D$ ), изменяется полное напряжение в перерабатываемом материале. В результате можно снизить полное напряжение в перерабатываемом материале в сегменте формования зоны дозирования до 7,3 МПа.

Таким образом, изменение отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру позволяет проводить процесс экструзии в энергосберегающих режимах и получать на выходе готовый кормовой продукт более прочной структуры.

#### **4.4 Исследование изменения химического состава перерабатываемого материала в процессе экструзии**

Для определения изменения химического состава перерабатываемого материала в процессе обработки на разработанной конструкции пресс-экструдера [194,195], были проведены экспериментальные исследования по экструдированию исходной зерновой смеси в составе: пшеница – 10%, ячмень – 70 %, овёс 19% и соль – 1 %, по методикам, приведенным в разделе 3.3.3. Проведенные анализы экструзии зерновой смеси показали (таблица 4.5), что в результате экструдирования происходит существенное изменение химического состава перерабатываемого материала. Так со 110 до 113,78 г (или на 3,3%) увеличивается концентрация сырого протеина – одного из основных показателей лимитирующих продуктивность животных. При этом возрастает не только количество протеина, но и повышается его физиологическая ценность за счет увеличения концентрации незаменимых аминокислот.

Исследованиями выявлено, что после экструдирования количество лизина, одной из самых дефицитных аминокислот увеличивается на 11,2% с 365,96 до 412,49 мг на 100 г, глицина – на 29,2 %, 413,38 до 584,1 мг на 100 г, триптофана – на 21%, метионина – 3,6%, цистина на 41%, аспарагиновой кислоты – 3,5%, аланина – 2,1%.

Таблица 4.5 – Результаты химического анализа перерабатываемого материала

Показатели	Единица измерения	Химический состав перерабатываемого материала				
		Зона загрузки	Зона плавления		Зона дозирования	
			сегмент транспортирования	сегмент сжатия	сегмент гомогенизации	сегмент формования
Сырой протеин	г на кг	110 ± 0,55	110 ± 0,55	111,56 ± 0,56	112,38 ± 0,56	113,52 ± 0,57
Сырая клетчатка	г на кг	61 ± 0,31	61 ± 0,31	59 ± 0,29	50,5 ± 0,27	49,5 ± 0,24
Сырой жир	г на кг	26 ± 0,13	26 ± 0,13	26,2 ± 0,13	26,3 ± 0,13	26,57 ± 0,13
Сухое вещество	%	87,71 ± 0,44	87,71 ± 0,44	87,6 ± 0,43	87,2 ± 0,43	87,06 ± 0,43
Сырая зола	%	2,42 ± 0,01	2,42 ± 0,01	2,39 ± 0,01	2,19 ± 0,01	2,17 ± 0,01
Обменная Энергия	МДж	10,9 ± 0,05	11,0 ± 0,05	11,3 ± 0,05	11,5 ± 0,06	11,7 ± 0,06
Кормовые единицы		0,96 ± 0,005	0,98 ± 0,005	1,03 ± 0,005	1,07 ± 0,005	1,11 ± 0,006
Аминокислоты						
Лизин	мг на 100 г	365,96 ± 1,83	365,96 ± 1,83	378,7 ± 1,89	403,11 ± 2,01	412,49 ± 2,06
Метионин		173,64 ± 0,87	173,64 ± 0,87	174,76 ± 0,87	178,46 ± 0,89	180,21 ± 0,90
Цистин		228,6 ± 1,14	228,6 ± 1,14	235,5 ± 1,17	274,6 ± 1,37	390,77 ± 1,95
Триптофан		127,88 ± 0,64	127,88 ± 0,64	131,5 ± 0,65	152,4 ± 0,76	161,89 ± 0,81
Аспарагиновая кислота		630,96 ± 3,15	630,96 ± 3,15	636,8 ± 3,18	649,8 ± 3,24	653,82 ± 3,26
Треонин		344,08 ± 1,72	344,08 ± 1,72	327,3 ± 1,63	297,3 ± 1,48	285,47 ± 1,43
Серин		454,8 ± 2,27	454,8 ± 2,27	442,6 ± 2,21	407,1 ± 2,03	394,27 ± 1,97
Глутаминовая кислота		2509,02 ± 12,54	2509,02 ± 12,54	2439,4 ± 12,19	2296,8 ± 11,48	2254,53 ± 11,27
Пролин		1380,22 ± 6,54	1380,22 ± 6,54	1305,6 ± 6,52	1198,1 ± 5,99	1168,75 ± 5,84
Глицин		413,38 ± 2,06	413,38 ± 2,06	539,9 ± 2,69	455,1 ± 2,27	584,1 ± 2,92
Аланин		440,13 ± 2,2	440,13 ± 2,2	442,38 ± 2,21	446,88 ± 2,23	449,77 ± 2,25
Валин		540,74 ± 2,7	540,74 ± 2,7	528,24 ± 2,64	503,24 ± 2,51	490,35 ± 2,45

При экструдировании зерновая масса на 2,1% обогащается сырым жиром – наиболее концентрированным источником энергии. На 18,8 % уменьшается объем клетчатки - наименее ценная часть зерновой смеси.

Вместе с тем необходимо учитывать, что при экструдировании зерновой смеси происходит некоторая потеря (до 0,25%) зольных элементов, уменьшается объем отдельных незаменимых и заменимых аминокислот: треонина на – 17,0%, валина - 9,3%, серина – на 13,3%, глутаминовой кислоты – на 10,1%, пролина – на 15,3%.

Данные изменения происходят в результате химических преобразований аминокислот в процессе экструзии: часть серина переходит в аланин путем гидратации, часть глутаминовой кислоты переходит в метионин, часть серина переходит в цистин, при дальнейшем объединении молекул валина с цистином образуется триптофан, при взаимодействии серина с аланином образуется лизин, часть треонина переходит в аспарагиновую кислоту, при распаде пролина образуется глицин.

В процессе экструзии происходит некоторая потеря сухого вещества на 0,65%.

В результате химических преобразований в перерабатываемом материале происходит увеличение обменной энергии и кормовых единиц на 1,8 % и 4%.

Следует отметить, что основные преобразования в зерновой смеси происходят в сегменте сжатия зоны плавления и сегменте гомогенизации зоны дозирования [193,194].

Так, сырой протеин в сегменте сжатия зоны плавления увеличивается до 111,56 г, в сегменте гомогенизации зоны дозирования – до 112,38 г; сырая клетчатка в сегменте сжатия зоны плавления уменьшается до 59 г, в сегменте гомогенизации зоны дозирования – до 50,5 г; сырой жир в сегменте сжатия зоны плавления увеличивается до 26,2 г, в сегменте гомогенизации зоны дозирования – до 26,3 г.

Сухое вещество в сегменте сжатия зоны плавления уменьшается на 0,11%, в сегменте гомогенизации зоны дозирования – на 0,5 %.

Вышеприведенные преобразования связаны с повышением внутримолекулярного взаимодействия в экструдированном материале, вызванного повышением его плотности [193,196].

Результаты исследования химического состава экструдированного материала показали, что при производстве экструдированных кормовых продуктов на разработанной конструкции шнека пресс-экструдера происходят глубокие химические преобразования в перерабатываемом материале, в результате которых увеличиваются энергетическая на 7,3% и питательная на 15,6 % ценность кормового продукта и наиболее важные для сельскохозяйственных животных незаменимые аминокислоты: лизин на 11,2 %, метионин на 3,6 % и триптофан на 21%.

#### **4.5 Определение оптимальных режимов и параметров процесса экструдирования с целью снижения энергоемкости и повышения качества готового кормового продукта**

Для определения оптимальных режимов и параметров процесса экструдирования кормовых продуктов были составлены трехфакторные эксперименты на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ  $2^3$  с исходными факторами (управляющими параметрами):

- отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру;
- частота вращения шнека;
- температура сырья на входе в экструдер.

В качестве параметров эффекта (управляемых и регулируемых параметров), взяты:

- комплексный показатель органолептических свойств экструдированного комбикорма;
- комплексный показатель физико-химических свойств экструдированного комбикорма;
- удельные затраты энергии на проведение процесса экструдирования.

Оценку качества готового кормового продукта проводили с помощью разработанного комплексного показателя физико-химических свойств [197].

Формула для расчета комплексного показателя физико-химических свойств:

$$K_{\phi-x} = \sum_{i=1}^n K_{3H_i} \cdot B_{K_i} , \quad (4.16)$$

где  $K_{3H}$  – коэффициент значимости показателя качества;

$B_{K_i}$  - присваиваемый балл качества.

Шкала перевода отдельных показателей в баллы комплексного показателя физико-химических свойств, представлена в приложении А.

В органолептические показатели входят: внешний вид, цвет, аромат. Органолептические свойства экструдированного кормового продукта оценивались отобранной группой экспертов, состоящей из пяти человек. Для этого разработали 15-бальную шкалу органолептической оценки тремя показателями качества. Значимость для каждого показателя определялась опросом группы экспертов, которые являются специалистами в области экструдированных кормов, хорошо знают продукт и его технологии. В приложении Б представлена шкала органолептической оценки качества экструдированных кормовых продуктов.

К физико-химическим показателям для экструдированных кормовых продуктов относят влажность, крошимость и прочность. Физико-химические параметры качества экструдированного кормового продукта были определены по стандартным методикам, согласно ГОСТ 22834-87. Так как большое количество показателей качества вызывало сложности при сравнении анализируемых образцов, был разработан комплексный показатель качества, объединяющий все единичные показатели с определенными коэффициентами значимости: влажность – 2, крошимость - 7, прочность – 7. Значения экспериментальных данных каждого физико-химического показателя, были умножены на соответствующие коэффициенты значимости и после суммирования составляли значение

комплексного показателя ( $K_{\phi-X}$ ). По результатам экспериментальных исследований составлены уравнения регрессии.

Для процесса экструдирования кормовых продуктов получены уравнения регрессии для определения качественных показателей и удельных затрат энергии:

- для определения комплексного показателя органолептических свойств экструдированного комбикорма по результатам экспертной оценки:

$$K_{OPГ} = 440 + 41,24 \cdot t - 36,125 \cdot (L/D) \cdot \omega_3 - 140,87 \cdot \omega_3 \cdot t - 173,6 \cdot (L/D)^2 - 135,5 \cdot \omega_3^2 - 54,79 \cdot t^2 \quad (4.17)$$

- для определения комплексного показателя физико-химических свойств экструдированного комбикорма:

$$K_{\phi-X} = 51,666 - 4,076 \cdot (L/D) + 9,484 \cdot \omega_3 - 7,875 \cdot \omega_3 \cdot t - 27,768 \cdot (L/D)^2 - 22,691 \cdot \omega_3^2 - 12,537 \cdot t^2 \quad (4.18)$$

- для определения удельных затрат энергии на проведение процесса экструдирования:

$$УЗЭ = 29,698 + 0,724 \cdot \omega_3 + 1,887 \cdot t - 0,966 \cdot (L/D) \cdot \omega_3 - 0,325 \cdot (L/D) \cdot \omega_3 \cdot t - 1,131 \cdot \omega_3^2 \quad (4.19)$$

где  $L/D$  - отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру;

$\omega_3$  - частота вращения шнека;

$t$  - температура сырья на входе в экструдер.

где величины  $L/D, \omega_3, t$  представлены в условных единицах. Перевод натуральных величин в условные единицы осуществляется выражениями:

- отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$ :

$$L/D = 2,5 \cdot L/D' - 2, \quad (4.20)$$

- частота вращения шнека  $\omega_3$  (об/мин):

$$\omega_3 = 0,0167 \cdot \omega_3' - 2, \quad (4.21)$$

- температура продукта на входе в экструдер  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ):

$$t = 0,05 \cdot t' - 2, \quad (4.22)$$

Графоаналитическая оптимизация процесса проводилась построением плоскостей отклика, представленных в приложениях В-Д. В приложении В представлены плоскости зависимости экспертной оценки органолептических

свойств от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  и частоты вращения шнека  $\omega$ , об/мин, при температуре продукта на входе в экструдер  $t=20$ ,  $t=40$  и  $t=60$  °С.

При анализе поверхности отклика органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки, при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С видно, что максимальная комплексная экспертная оценка органолептических свойств, свыше 670 баллов, достигается при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,64 м до 0,92 м (от -0,4 до 0,3 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 120 до 162 об/мин (от 0 до 0,7 у. е.).

При анализе поверхности отклика органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки, при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40$  °С видно, что максимальная комплексная экспертная оценка органолептических свойств, свыше 610 баллов, достигается при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,64 м до 0,96 м (от -0,4 до 0,4 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 96 до 144 об/мин (от - 0,4 до 0,4 у. е.).

При анализе поверхности отклика органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки, при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60$  °С видно, что максимальная комплексная экспертная оценка органолептических свойств, свыше 680 баллов, достигается при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,68 м до 0,96 м (от -0,3 до 0,4 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 66 до 108 об/мин (от - 0,9 до -0,2 у. е.).

Наилучшим являются отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,68 м до 0,96 м (от -0,3 до 0,4 у. е.) и частота вращения шнека  $\omega$ , – от 66 до 108 об/мин (от - 0,9 до - 0,2 у. е.), при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60$  °С. При этом можно достигнуть экспертной оценки органолептических свойств, свыше 680 баллов.

В приложении Г представлены поверхности отклика зависимости комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта от

отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  и частоты вращения шнека  $\omega$ , об/мин, при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$ ,  $t=40$  и  $t=60$  °С.

При анализе поверхности отклика комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С видно, что максимальным комплексным показателем физико-химических свойств, свыше 95 баллов, является показатель при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,64 м до 0,92 м (от – 0,4 до 0,3 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 120 до 162 об/мин (от 0 до 0,7 у. е.).

При анализе поверхности отклика комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40$  °С видно, что максимальным комплексным показателем физико-химических свойств, свыше 93 баллов, является показатель, при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,64 м до 0,92 м (от -0,4 до 0,3 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 114 до 150 об/мин (от - 0,1 до 0,5 у. е.).

При анализе поверхности отклика комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60$  °С видно, что максимальным комплексным показателем физико-химических свойств, свыше 95 баллов, является показатель, при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,68 м до 0,86 м (от -0,3 до 0,15 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 108 до 138 об/мин (от - 0,2 до 0,3 у. е.).

Наилучшим являются отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,64 м до 0,92 м (от – 0,4 до 0,3 у. е.) и частота вращения шнека  $\omega$ , – от 120 до 162 об/мин (от 0 до 0,7 у. е.), при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60$  °С. При этом можно достичь комплексного показателя физико-химических свойств, свыше 95 баллов.

В приложении Д представлены поверхности отклика зависимости удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  и частоты вращения шнека  $\omega$ , об/мин, при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$ ,  $t=40$  и  $t=60$  °С.

При анализе поверхности отклика удельных затрат энергии при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С видно, что минимальные удельные затраты энергии, менее 26,5 Вт/кг, достигаются при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,4 м до 0,52 м (от – 1 до – 0,7 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 60 до 63 об/мин (от -1 до – 0,95 у. е.)

При анализе поверхности отклика удельных затрат энергии при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40$  °С видно, что минимальные удельные затраты энергии, менее 28 Вт/кг, достигаются при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,4 м до 0,48 м (от – 1 до – 0,8 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 60 до 61,5 об/мин (от –1 до – 0,97 у. е.)

При анализе поверхности отклика удельных затрат энергии при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60$  °С видно, что минимальные удельные затраты энергии, менее 29,5 Вт/кг, достигаются при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,4 м до 0,44 м (от – 1 до – 0,9 у. е.) и частоте вращения шнека  $\omega$ , – от 60 до 61 об/мин (от –1 до – 0,98 у. е.)

Наилучшими являются отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$  – от 0,4 м до 0,52 м (от – 1 до – 0,7 у. е.) и частота вращения шнека  $\omega$ , – от 60 до 63 об/мин (от –1 до – 0,95 у. е.), при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С. При этом можно достигнуть значений удельных затрат энергии менее 26,5 Вт/кг.

Оптимизацию параметров процесса экструдирования проводили путем наложения горизонтальных проекций плоскостей отклика, представленных в приложениях Е-З, при различных температурах.

При наложении горизонтальных проекций зависимостей органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки, физико-химических свойств кормового продукта и удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С была выделена область оптимальных режимов экструдирования: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$ , равное  $0,77 - 0,81$  м (от  $0,08$  до  $0,02$  у. е.) и частота вращения шнека, равная  $171 - 174$  об/мин (от  $0,87$  до  $0,9$  у. е.), при этом комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта составит более 670 баллов, комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта – более 95 баллов и удельные затраты энергии  $\leq 28,5$  Вт/кг.

При наложении горизонтальных проекций зависимостей органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки, физико-химических свойств кормового продукта и удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека, при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40$  °С установлено, что оптимальными являются отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$ , равное  $0,66 - 0,88$  м (от  $0,35$  до  $0,2$  у. е.) и частота вращения шнека, равная  $108 - 119,5$  об/мин (от  $0,2$  до  $0,02$  у. е.), при этом комплексный показатель органолептических свойств составит более 610 баллов, комплексный показатель физико-химических свойств – более 93 баллов и удельные затраты энергии  $\leq 30,5$  Вт/кг.

При наложении горизонтальных проекций зависимостей органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки, физико-химических свойств кормового продукта и удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60$  °С установлено, что оптимальными являются отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$ , равное  $0,68 - 0,84$  (от  $0,3$  до  $0,1$  у. е.) и

частота вращения шнека, равная 90 – 99 об/мин (от – 0,5 до – 0,35 у. е.), при этом комплексный показатель органолептических свойств составит более 680 баллов, комплексный показатель физико-химических свойств – более 95 баллов и удельные затраты энергии  $\leq 31,5$  Вт/кг.

Наиболее оптимальной является область, ограниченная линиями: комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта – более 670 баллов, комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта – более 95 баллов и удельные затраты энергии  $\leq 28,5$  Вт/кг. При этом отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру должно составлять от 0,77 м до 0,81 м ( $- 0,08 \div 0,02$  в безразмерном выражении), частота вращения шнека от 171 об/мин до 174 об/мин ( $0,87 \div 0,9$  в безразмерном выражении), при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С.

Наложение горизонтальных проекций зависимостей органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки, физико-химических свойств кормового продукта и удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С, представлено на рисунке 4.7.

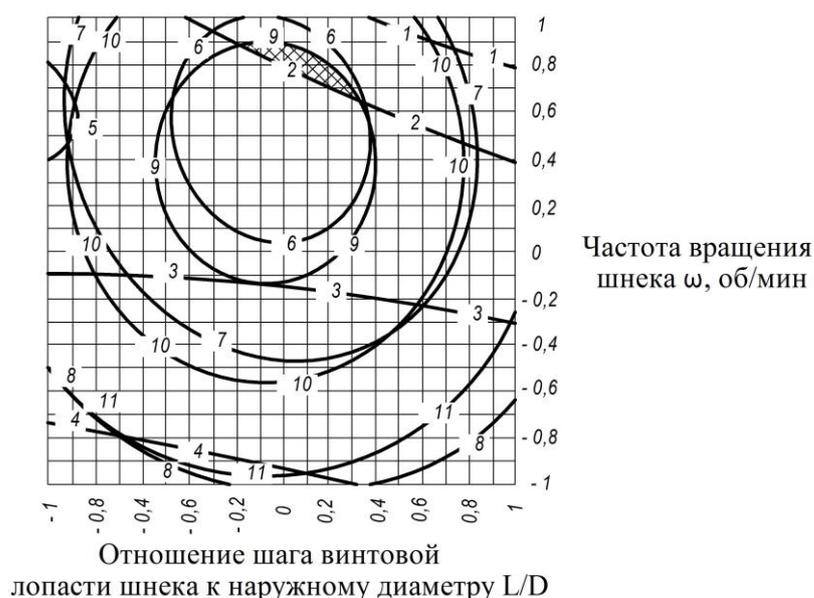


Рисунок 4.7 – Оптимальное сочетание поверхностей отклика для процесса экструдирования кормового продукта (область заштрихована): 1 – УЗЭ=28,5 Вт/кг; 2 – УЗЭ=28,0 Вт/кг; 3 – УЗЭ=29,0 Вт/кг; 4 – УЗЭ=28,5 Вт/кг; 5 – УЗЭ=27,0

Вт/кг; 6 –  $K_{ОРГ}=670$  баллов; 7–  $K_{ОРГ}=570$  баллов; 8 –  $K_{ОРГ}=370$  баллов; 9 –  $K_{Ф-Х}=88$  баллов; 10 –  $K_{Ф-Х}=74$  балла; 11 –  $K_{Ф-Х}=67$  баллов (УЗЭ – удельные затраты энергии;  $K_{ОРГ}$  – комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта;  $K_{Ф-Х}$  – комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта)

Является целесообразным наложение вышеуказанных ограничений на разработанную математическую модель, с целью соблюдения оптимальных параметров процесса экструзии, что обеспечит наилучшее качество экструдированных кормовых продуктов, при минимальных удельных затратах энергии на производство.

### **Выводы по четвертой главе**

1. На основании экспериментальных данных исследования зависимости структурно-механических и реологических параметров экструдированного материала от параметров технологического процесса, получены уравнения регрессии, описывающие зависимость динамического коэффициента трения от отношения шага винтовой лопасти шнека, крутящего момента в зоне загрузки и температуры сырья на входе в экструдер (уравнение 4.3) и уравнения регрессии, описывающие зависимость модуля упругости и вязкости от отношения шага винтовой лопасти шнека, крутящего момента в зоне плавления и температуры перерабатываемого материала (уравнение 4.10). Данные уравнения позволяют наиболее полно учесть особенности перерабатываемого материала в разработанной математической модели.

2. В результате анализа соответствия расчетных данных экспериментальным установлено, что процент отклонения математической модели от экспериментальных данных составил 3-5%, что удовлетворяет требуемой точности моделирования. Теоретические расчеты подтверждены

экспериментально, а разработанная математическая модель достаточно хорошо описывает реальный процесс экструзии.

3. Проведены экспериментальные исследования зависимости технологических и физико-химических параметров от параметров технологического процесса, результаты которых свидетельствуют о неэффективной работе шнековой камеры пресс-экструдера в сегменте сжатия зоны плавления при использовании стандартной конструкции шнека.

На основании исследований процесса производства экструдированных кормовых продуктов на разработанной конструкции шнека пресс-экструдера получены уравнения регрессии, описывающие зависимость физико-химических параметров от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и влажности перерабатываемого материала, на основании которых построены плоскости отклика.

В результате анализа полученных плоскостей отклика, сделан вывод, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру можно значительно повысить плотность перерабатываемого материала в зонах шнековой камеры до  $1400 \text{ кг/м}^3$  и снизить полное напряжение в перерабатываемом материале до  $7,3 \text{ МПа}$ , что позволяет проводить процесс экструзии в энергосберегающих режимах и получать на выходе готовый кормовой продукт более прочной структуры.

4. Результаты исследования химического состава экструдированного материала показали, что при производстве экструдированных кормовых продуктов на разработанной конструкции шнека пресс-экструдера происходят глубокие химические преобразования в перерабатываемом материале, в результате которых увеличиваются энергетическая на  $7,3\%$  и питательная на  $15,6\%$  ценность кормового продукта и наиболее важные для сельскохозяйственных животных незаменимые аминокислоты: лизин на  $11,2 \%$ , метионин на  $3,6 \%$  и триптофан на  $21\%$ .

Основные преобразования в зерновой смеси происходят в сегменте сжатия зоны плавления и сегменте гомогенизации зоны дозирования. Данные

преобразования связаны с повышением внутримолекулярного взаимодействия в экструдированном материале, вызванного повышением его плотности.

5. Разработан комплексный показатель физико-химических свойств экструдированного кормового продукта, объединяющий существующие в производстве частные показатели качества с учетом коэффициентов их значимости.

6. Соблюдение оптимальных параметров процесса экструдирования обеспечивает получение наименьших удельных затрат энергии на производство экструдированных кормовых продуктов и наибольшего комплексного показателя физико-химических и органолептических свойств кормового продукта. Оптимальными с точки зрения получения наилучшего качества кормового продукта при минимальных затратах энергии, являются параметры процесса экструзии: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру 0,77 - 0,81 частота вращения шнека 171 - 174 об/мин, температура сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С.

Является целесообразным наложение вышеуказанных ограничений на разработанную математическую модель, с целью соблюдения оптимальных параметров процесса экструзии, что обеспечивает наилучшее качество экструдированных кормовых продуктов, при минимальных удельных затратах энергии на производство.

## 5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

### 5.1 Модернизация одношнекового пресс-экструдера

В большинстве своем пресс-экструдер содержит следующие элементы: шнековую камеру, состоящую из шнека и шнекового корпуса, привод, станину, а так же матрицу с формующими каналами и загрузочное устройство. Шнековая камера зачастую выполняется разъемной.

Разработанная конструкция одношнекового пресс-экструдера (рисунок 5.1) состоит из: подшипникового узла 1, загрузочной воронки 2, разъемных корпусов шнековой камеры 3, привода 4, формующей головки 5, шнека 6 с витками 7, резьбового вала 8, расположенного в теле шнека, приводного механизма (исполнительного элемента) 9, втулок 10 с установленными пальцами 11, перемещающимися по направляющим 12, выполненным в теле шнека 6 (заявка на патент РФ № 2016129886/05 от 20.07.2016).

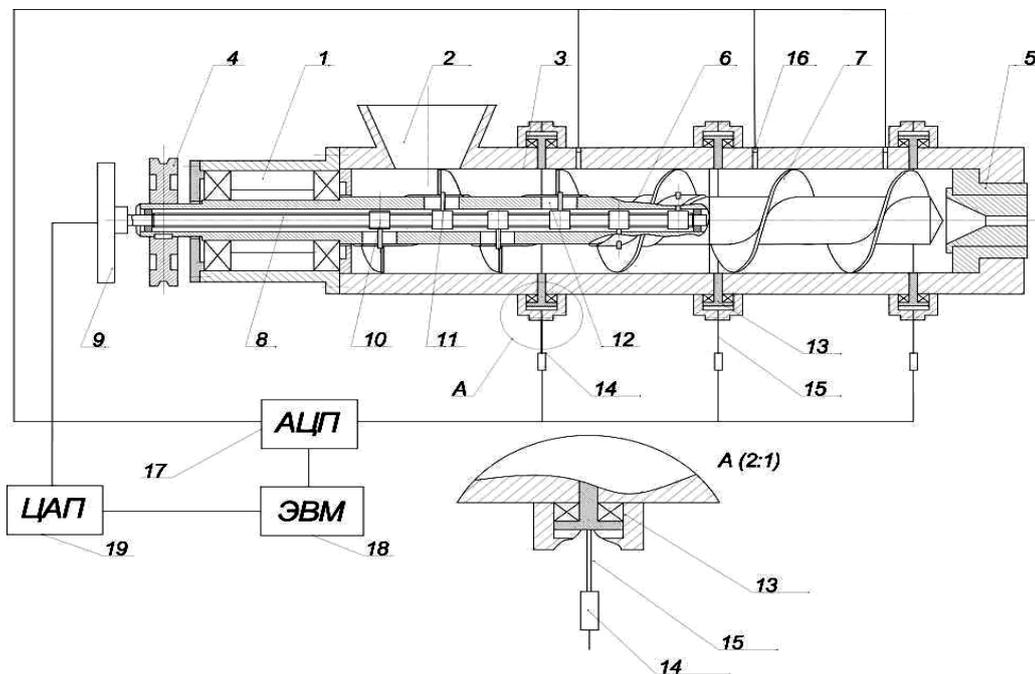


Рисунок 5.1 – Схема установки для производства экструдированных кормовых продуктов

Также разработанная конструкция пресс-экструдера содержит устройства для измерения крутящего момента, состоящие из цилиндрической вставки 13,

тензодатчиков 14, гибких элементов 15, и датчики температуры 16. Датчики температуры 16 и устройства для измерения крутящего момента соединены через аналого-цифровой преобразователь 17 с компьютером 18, который в свою очередь соединен с цифро-аналоговым преобразователем 19.

Сыпучий материал поступает в загрузочную воронку 2, попадая в зону загрузки. В зоне загрузки, на расстоянии  $z=0,08$  м от загрузочного устройства 2, находится первый измерительный элемент, состоящий из цилиндрической вставки 13, тензодатчика 14 и гибкого элемента 15, который измеряет крутящий момент в конце зоны загрузки. Далее материал под воздействием вращающихся витков 7 шнека 6 перемещается в сегмент сжатия зоны плавления. В сегменте сжатия зоны плавления на расстоянии  $z=0,3$  м от загрузочного устройства 2 находится второй измерительный элемент, который измеряет крутящий момент в конце зоны плавления. После сжимания, материал поступает в сегмент гомогенизации зоны дозирования, где происходит превращение размягченных частиц в однородный расплав. Затем продукт попадает в сегмент формования зоны дозирования и продавливается через формующую головку 5. В районе формующей головки, на расстоянии  $z=0,6$  м от загрузочного устройства 2 установлен третий измерительный элемент, который измеряет крутящий момент в дозирующей зоне. Одновременно датчиками 16 измеряется температура перерабатываемого материала в экструдере.

После регистрации сигнала, получаемого от устройств, для измерения крутящих моментов и датчиков температуры 16, на аналого-цифровом преобразователе 17, данные передаются в компьютер 18, преобразуясь в численные значения измеряемой величины.

При изменении плотности поступающего на переработку материала возникает необходимость в изменении скорости подачи материала в зону сжатия. Компьютер 18 передает данные на цифро-аналоговый преобразователь 19. Цифро-аналоговый преобразователь 19 дает команду исполнительному элементу (приводному механизму) 9. Исполнительный элемент 9, приводит во вращение резьбовой вал 8. При вращении резьбового вала 8, происходит перемещение

штулок 10, на которых установлены пальцы 11, вдоль оси шнека 6 по направляющим 12, выполненным в теле шнека 6. Пальцы 11 при этом увлекают за собой витки шнека 7. При изменении расстояния между витками 7, происходит изменение их угла наклона. В результате чего изменяется соотношение тангенциальной (обеспечивающей вращение и перемешивание материала) и аксиальной (обеспечивающей продвижение материала вдоль шнекового канала) составляющей сил воздействия шнека 6 на обрабатываемый материал.

За счет изменения данного соотношения, происходит изменение скорости перемещения материала в зоне загрузки и сегменте транспортирования зоны плавления, и, как следствие скорость подачи его в сегмент сжатия зоны плавления. Таким образом, появляется возможность регулирования скорости подачи материала в сегмент сжатия зоны плавления, а также регулирования давления материала на выходе из сегмента сжатия зоны плавления, в сегментах гомогенизации и формования зоны дозирования, что обеспечивает снижение энергоемкости процесса экструзии и получение высококачественной продукции.

В качестве стандартной экспериментальной установки использовали одношнековый малогабаритный пресс-экструдер ПЭШ-30/4, выпускаемый ОАО “Орстан”.

Разработанная конструкция пресс-экструдера базируется на стандартных расчетах.

Технический расчет потребляемой мощности шнекового пресс-экструдера аналогичен расчету, приведенному в учебном издании А.Я. Соколова [198]. Он выполняется по геометрическим параметрам шнека. Полная мощность на валу шнекового пресс-экструдера представлена выражением:

$$N_{ш} = \frac{q_{сек} \cdot P_m}{100 \cdot \eta_{ш} \cdot 102} \text{ кВт}, \quad (5.1)$$

где  $q_{сек} = \sum f_0 \nu \cdot 100$  - объем выпрессованных за 1 секунду изделий в  $\text{см}^3 / \text{сек}$  ;

$\sum f_0$  - суммарная площадь живого сечения отверстий на матрице,  $\text{см}^2$  ;

$\nu$  - средняя скорость выпрессовывания изделий,  $\text{м} / \text{сек}$  ;

$P_m$  - давление у матрицы,  $\text{кг} / \text{см}^2$  ;

$\eta_{ш}$  - объемный коэффициент полезного действия шнека, для стандартной конструкции шнека  $\eta_{ш} = 0,25$ .

Отличительной особенностью разработанной конструкции пресс-экструдера является изменяющееся в процессе работы отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру  $L/D$ , которое составляет в зонах загрузки и плавления: минимальное –  $L/D_{\min} = 0,4$ , максимальное –  $L/D_{\max} = 1,2$ . В дозирующей зоне отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру является постоянным и составляет  $L/D = 0,7$ . При изменении физико-механических характеристик поступающего на переработку сырья производятся измерения данных характеристик и автоматическая установка  $L/D$ , соответствующего наиболее оптимальной переработке сырья. В результате  $\eta_{ш}$  увеличивается до 0,30, что позволяет снизить  $N_{ш}$  и соответственно удельные затраты энергии на 16%.

Производительность пресс-экструдера рассчитывали по формуле:

$$Q = g_{сек} \cdot \rho \quad \text{г/сек}, \quad (5.2)$$

где  $\rho$  - плотность готового продукта,  $\text{г/см}^3$

Результаты технического расчета стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера представлены в таблице 5.1

Удельные затраты энергии на производство экструдированных пищевых и кормовых продуктов определяли согласно формуле (3.3)

Таблица 5.1 - Результаты технического расчета стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера

Обозначение параметра	Расчетные данные	
	Пресс-экструдер стандартной конструкции	Пресс-экструдер разработанной конструкции
$N_{ш}$ , Вт	2,7	2,3
$Q$ , кг/ч	350	410
УЭЗ, Вт/кг	27,7	20,2

Из таблицы 5.1 можно сделать вывод, что применение разработанной конструкции пресс-экструдера вместо стандартной позволяет повысить производительность на 16%, снизить полную мощность на валу шнекового пресс-экструдера и удельные затраты на производство экструдированных кормовых продуктов на 16 %.

На разработанную конструкцию пресс-экструдера с параметрами шнека изменяющимися непосредственно в процессе работы получен патент РФ (Приложение И)

## 5.2 Обоснование разработанной конструкции пресс-экструдера

С целью обоснования разработанной конструкции проведены контрольные испытания процесса производства экструдированных кормовых продуктов на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера.

Контрольные испытания проводились на ОАО «Оренбургский комбикормовый завод». В качестве исходного сырья использовали зерновую смесь в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль поваренная – 1%. Экспериментальные данные, полученные на стандартном и разработанном пресс-экструдере, после выхода на оптимальный режим, представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Апробация экспериментальных данных

№ п/п	Наименование параметров технологического процесса	Конструкция пресс-экструдера	
		Стандартная конструкция	Разработанная конструкция
1	Производительность, кг/ч	323	375
2	Расход электроэнергии, кВт/ч	10,5	10
3	Расход воды на 1 т. зерносмеси, л	300	300
4	Влажность обрабатываемого материала, %	17	17
5	Влажность экструдированного кормового продукта, %	10	10
6	Потери при экструдировании зерносмеси, %	0,2	0,1

Продолжение таблицы 5.2

7	Негодные отходы, %	0,5	0,2
8	Потери при упаковке, %	1	1
9	Выход готовой продукции, кг/ч	321,9	373,1
10	Расход мешков на 100 кг готовой продукции, шт.	0,5	0,5
11	Количество некондиционного экструдата, %	6	4
12	УЗЭ, Вт/кг	34	28,5
13	$K_{ф-х}$ , балл	95	106
14	$K_{орг}$ , балл	650	670

Были определены: качественные показатели готового кормового продукта; органолептические свойства методом экспертной оценки и физико-химические свойства с помощью комплексного показателя; удельные затраты на процесс экструдирования на стандартной конструкции пресс-экструдера и разработанной.

Сравнительный анализ качественных показателей готового кормового продукта и удельных затрат энергии процесса экструдирования представлен на рисунке 5.2.

Проведенные испытания показали, что применение пресс-экструдера с измененной конструкцией шнека позволяет снизить удельные затраты энергии на 16 %, повысить комплексный показатель физико-химических свойств на 11,5 %, комплексный показатель органолептических свойств на 3%.

По результатам экспериментальных исследований получен акт производственных испытаний (Приложение К).

Из вышесказанного можно заключить, что разработанная конструкция шнека пресс-экструдера, за счет подбора оптимальных параметров, позволяет получать экструдированные кормовые продукты, отличающиеся более высокими качественными показателями и снизить затраты энергии на производство продукции.

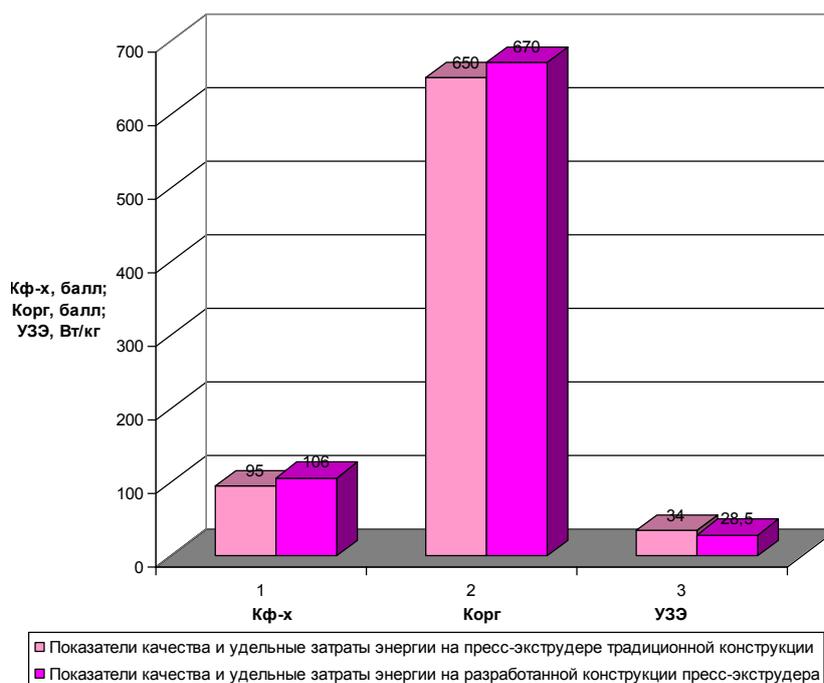


Рисунок 5.2 - Сравнительный анализ качественных показателей готового кормового продукта и удельных затрат энергии на проведение процессов экструдирования кормовых продуктов

На основании экспериментальных данных было разработано программное средство «Критериальная оценка эффективности технологии экструдирования белково-крахмало-клетчаткосодержащего сырья», позволяющее определить эффективность технологии экструдирования с помощью критериальной оценки по трем критериям: критерий глубины переработки сырья, критерий безотходности технологического процесса и критерий экологичности (Приложение Л).

Анализ эффективности применения разработанной конструкции пресс-экструдера показывает, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру можно повысить критерий глубины переработки сырья на 4 %, (с 0,9498355 до 0,989412), критерий безотходности технологического процесса на 5 % (с 0,867541 до 0,913201) и критерий экологичности на 3 % (с 0,9678815 до 0,997816).

### 5.3 Исследование изменения продуктивного действия и энергетической ценности кормов в процессе экструзионной обработки

Для каждого вида сырья в зависимости от его первоначальных структурно-механических свойств, следует предусмотреть оптимальные условия его преобразования, которые в том числе подразумевают преобразование химического состава. Преобразования химического состава должны производиться как можно более интенсивно, но при этом не должны затрагивать ограничения, накладываемые на технологический процесс, связанные с обеспечением требуемых показателей качества готового экструдированного продукта (не должно происходить подгорания, механического разрушения и т.д. перерабатываемого материала).

С целью изучения изменения химического состава в процессе производства экструдированных кормовых продуктов на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера, были исследованы три образца: контрольный образец – исходная неэкструдированная зерновая смесь в составе: пшеница – 10%, овёс – 19 %, ячмень – 70%, соль поваренная – 1%, I – кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера и II – кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера по методике, приведенной в пункте 3.3.3. Результаты исследований представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Анализ изменения химического состава сырья в процессе производства экструдированных кормовых продуктов, г/кг СВ.

Показатели	Химический состав		
	образец контрольный	I образец	II образец
Сырой протеин	125,4 ± 5,55	128,9 ± 4,57	130,4 ± 4,52
Сырая клетчатка	69,5 ± 1,31	64,9 ± 1,24	56,8 ± 1,27
Сырой жир	29,6 ± 1,13	30,1 ± 1,13	30,5 ± 1,15
Сухое вещество, %	87,7 ± 1,43	92,0 ± 1,44	92,0 ± 1,46
БЭВ	624,7	670,7	677,4

Кормовые единицы	0,96 ± 0,005	1,07± 0,006	1,11± 0,006
Концентрация обменной энергии, МДж/кг СВ	12,4	12,5	12,7
КПИ ОЭ	0,434	0,436	0,445
Аминокислоты, мг на 100 г СВ			
Лизин	417,2 ± 11,83	450,5± 12,01	474,12 ± 12,06
Метионин	197,9 ± 10,87	204,2± 10,89	207,13 ± 10,90
Цистин	260,6± 12,07	338,9± 11,14	449,15 ± 11,95
Триптофан	145,8 ± 10,64	175,7± 10,74	186,1 ± 1 0,81
Аспарагиновая кислота	719,5 ± 13,15	728,6± 13,19	751,5 ± 13,26
Треонин	392,3 ± 11,72	328,1 ± 11,43	320,8± 11,56
Серин	518,5 ± 12,27	453,2 ± 11,97	438,8± 11,80
Глутаминовая кислота	2860,9 ± 22,5	2591,4 ± 21,27	2444,1± 20,98
Пролин	1573,7 ± 16,54	1343,4 ± 15,84	1278,7± 15,32
Глицин	471,4 ± 12,06	582,0± 12,71	671,3 ± 12,92
Аланин	501,8 ± 12,2	510,5± 12,21	516,9 ± 12,25
Валин	616,6 ± 12,7	582,8±10,35	563,6 ± 12,45

Примечание: \*P<0,01

Результаты проведенных экспериментальных исследований по изучению химического состава, показали, что в процессе экструзионной обработки происходят значительные изменения химического состава зерновой смеси. Следует отметить, что в процессе экструзионной обработки на разработанной конструкции пресс-экструдера происходят более глубокие химические преобразования, в отличие от стандартной конструкции пресс-экструдера.

Так, по результатам исследований, в I и II образце наблюдалось увеличение концентрации сырого протеина - на 2,7 % и 3,8 % по сравнению с контрольным.

Во II образце сырого протеина больше на 1,15 по сравнению с I образцом. В I и II образце больше на 1,7 % и 3% по сравнению с контрольным сырого жира. Во II образце сырого жира больше на 1,3% по сравнению с I образцом. В I и II образце меньше на 7 % и 18,2% по сравнению с контрольным, меньше содержится сырой клетчатки. Во II образце сырой клетчатки меньше на 14,3% по сравнению с I образцом. В I и II образце больше на 6,8 % и 7,8% по сравнению с контрольным, безазотистых экстрактивных веществ. Во II образце безазотистых экстрактивных веществ больше на 0,98% по сравнению с I образцом.

В процессе экструзионной обработки происходит незначительное увеличение кормовых единиц, однако следует отметить, что II образец, экструдированный на разработанной конструкции, отличается от I образца, экструдированного на стандартной конструкции, большим их содержанием: во II образце на 3,6% по сравнению с I образцом.

Также II образец отличался от контрольного образца и I образца большей концентрацией основных незаменимых аминокислот, лимитирующих продуктивность животных. Количество лизина во II образце было больше на 5 % по сравнению с I образцом и на 12 % по сравнению с контрольным; триптофана – на 5,6% больше по сравнению с I образцом и на 21,6% по сравнению с контрольным, метионина – на 1,4% больше по сравнению с I и на 4,45% по сравнению с контрольным. Таким образом, кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, содержит больше лизина, триптофана и метионина, которые являются «критическими» аминокислотами. Организм животных их не может синтезировать и часто животные испытывают их недостаток, что неблагоприятно отражается на жизнедеятельности их организма [199].

В процессе экструзии происходит увеличение некоторых заменимых аминокислот: количество цистина на 24,5 % больше во II образце по сравнению с I образцом и на 41,9% по сравнению с контрольным; количество глицина - на 13,3 % больше по сравнению с I образцом и на 29,7% по сравнению с контрольным; количество аланина - на 1,4 % больше по сравнению с I образцом и на 2,9% по сравнению с контрольным; количество аспарагиновой кислоты - на 3,0 % больше по сравнению с I образцом и на 4,3% по сравнению с контрольным.

Вместе с тем, следует отметить, что в процессе экструзии происходит снижение таких незаменимых аминокислот как валин и треонин, и заменимых аминокислот – серин, глутаминовая кислота и пролин. Количество валина во II образце - на 3,4 % меньше по сравнению с I образцом и на 9,4% по сравнению с контрольным; количество треонина - на 2,3 % меньше по сравнению с I образцом и на 22,3% по сравнению с контрольным; количество серина - на 3,3 % меньше по

сравнению с I образцом и на 18,1% по сравнению с контрольным; количество глутаминовой кислоты - на 6,0 % меньше по сравнению с I образцом и на 17% по сравнению с контрольным; количество пролина на 5,1 % меньше по сравнению с I образцом и на 23,1% - по сравнению с контрольным.

С целью энергетической оценки кормов было определено содержание обменной энергии в сухом веществе кормовых продуктов. Результаты показали, что за счет химических преобразований, произошедших в экструдированных кормовых продуктах, увеличилась их обменная энергия. Следует отметить, что кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, отличался большей энергетической ценностью: во II образце концентрация обменной энергии выше на 1,6% по сравнению с I образцом и на 2,4 % - с контрольным образцом.

Таким образом, кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, обладает большей энергетической на 1,6 % и питательной ценностью на 3,6 % и более качественным протеином по основным незаменимым аминокислотам: лизина больше на 5%, метионина – на 1,4%, триптофана – на 5,6%, в отличие от кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции пресс-экструдера, что является важным фактором, определяющим продуктивность животных.

#### **5.4 Исследования по оценке перевариваемости экструдированных кормовых продуктов и неэкструдированной зерновой смеси**

Корма, скармливаемые подопытным животным, при любом химическом составе могут иметь разную перевариваемость питательных веществ, что в конечном счете, и определяет их продуктивную ценность.

Исследования по оценке перевариваемости «in situ» на молодняке крупного рогатого скота с фистулой в рубце показали (рисунок 5.3), что перевариваемость в рубце экструдированных кормовых продуктов, у бычков была выше, в отличие неэкструдированной зерновой смеси. Перевариваемость кормового продукта,

экструдированного на стандартной конструкции пресс-экструдера составила  $62,7\% \pm 1,9$  ( $P < 2,8\%$ ); кормового продукта, экструдированного на разработанной конструкции пресс-экструдера составила  $67,4\% \pm 0,89$  ( $P < 1,4\%$ ); неэкструдированной зерновой смеси –  $57,17\% \pm 1,3$  ( $P < 2,3\%$ ).

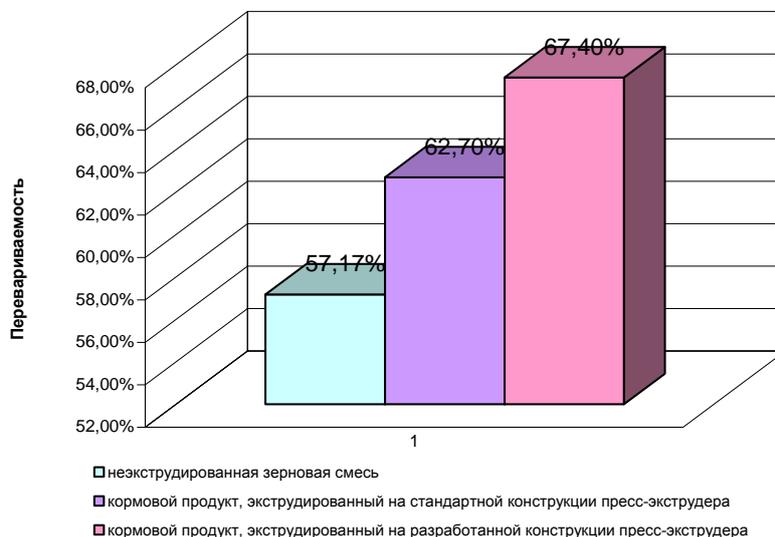


Рисунок 5.3 – Перевариваемость кормов в рубце молодняка крупного рогатого скота

Перевариваемость кормовых продуктов, экструдированных на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера выше перевариваемости неэкструдированной зерновой смеси на 8,8% и 15,7% соответственно.

Из графика, представленного на рисунке 5.3 также видно, что перевариваемость в рубец кормового продукта, экструдированного на разработанной конструкции пресс-экструдера выше на 6,9 % перевариваемости кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции пресс-экструдера.

Таким образом, компоненты экструдированных кормовых продуктов отличаются от неэкструдированной зерновой смеси большей способностью распадаться в пищеварительном тракте до простых веществ, усваиваемых организмом. Вместе с тем, кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера имеет более высокую перевариваемость питательных веществ на 6,9 %, а, следовательно, большую

продуктивную ценность, в отличие от кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции пресс-экструдера.

Является целесообразным провести исследования по изучению влияния кормового продукта, полученного на разработанной и стандартной конструкции пресс-экструдера на повышение питательности рационов и, как следствие, повышение продуктивности мясного скота.

### **5.5 Изучение влияния экструдированных кормовых продуктов на повышение энергетической и питательной ценности рационов и, как следствие, повышение мясной продуктивности скота**

Главным условием улучшения переваривающей способности пищеварительного тракта и повышения продуктивного действия кормов является концентрация энергии и протеина в единице сухого вещества и непрерывность снабжения организма необходимыми питательными веществами [200,201].

В связи с этим, были проведены испытания экструдированных кормовых продуктов на фоне контрольного рациона, который состоял из сена бобово-злакового, силоса кукурузного, соломы ячменной, зерна ячменя, зерна гороха, минеральной подкормки, поваренной соли.

Особенность кормления по группам заключалась в том, что в рационе животных опытных групп 30% рациона заменяли на экструдированный кормовой продукт: в I опытной группе заменили на кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера, во II – на кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера (Таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Характеристика рационов подопытных животных, кг

Показатель	Группы		
	контрольная	I опытная	II опытная
Сено бобово-злаковое, кг	3,0	2,4	2,4
Силос кукурузный, кг	6,0	4,8	4,8
Солома ячменная, кг	1,0	0,8	0,8
Ячмень зерно, кг	3,0	2,4	2,4

Продолжение таблицы 5.3

Горох зерно, кг	0,7	0,6	0,6
Кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера, кг	-	2,7	-
Кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, кг	-	-	2,7
Минеральная подкормка, кг	0,05	0,05	0,05
Поваренная соль, кг	0,03	0,02	0,02
В рационе содержится:			
Кормовых единиц, кг	6,58	7,56	7,8
Обменной энергии, МДж	80,8	87,2	88,7
Сухого вещества, кг	8,12	8,17	8,17
Сырого протеина, кг	1,04	1,07	1,08
Сырого жира, кг	0,17	0,20	0,21
Сырой клетчатки, кг	1,64	1,32	1,3
БЭВ, кг	4,48	4,94	4,96
Лизин, г	28,87	36,4	37,1
Метионин+цистин, г	26,98	36,64	41,85
Триптофан, г	7,69	10,9	11,8

Из представленной таблицы видно, что рационы опытных групп, в составе которых были экструдированные кормовые продукты, отличались большей энергетической и питательной ценностью, а также более качественным протеином, с точки зрения основных незаменимых аминокислот: лизина, метионина и триптофана.

Как известно, энергонасыщенные и высококачественные корма животные поедают охотно, и их продуктивность в значительной степени зависит от усвоения энергии кормов.

Научно-хозяйственный опыт показал, что введение в рацион экструдированных кормовых продуктов в некоторой степени повысило поедаемость объемистых кормов (таблица 5.5).

Вместе с тем, введение в рацион кормового продукта, экструдированного на разработанной конструкции пресс-экструдера в большей степени повысило

поедаемость сена на 2,2 % и силоса на 1,06% в сравнении с кормовым продуктом, экструдированным на стандартной конструкции пресс-экструдера.

Таблица 5.5 – Фактическое потребление кормов опытными животными, кг

Показатель	Группы		
	контрольная	I опытная	II опытная
Сено бобово-злаковое	2,7	2,25	2,3
Силос кукурузный	5,8	4,65	4,7
Солома ячменная	0,6	0,5	0,5
Ячмень зерно	3,0	2,4	2,4
Горох зерно	0,7	0,5	0,5
Кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера	-	2,7	-
Кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера	-	-	2,7
Минеральная подкормка	0,05	0,05	0,05
Поваренная соль	0,03	0,02	0,02
В рационе содержится:			
Кормовых единиц, кг	6,19	7,17	7,45
Обменной энергии, МДж	75,5	82,6	84,9
Сухого вещества, кг	7,46	7,67	7,8
Сырого протеина, кг	0,97	1,01	1,03
Сырого жира, кг	0,16	0,19	0,20
Сырой клетчатки, кг	1,42	1,25	1,24
БЭВ, кг	4,19	4,68	4,74
Лизин, г	26,9	34,7	35,7
Метионин+цистин, г	25,2	34,9	40,2
Триптофан, г	7,2	10,4	11,3

Оценка фактической поедаемости кормов показала, что подопытные животные I и II группы за период научно-хозяйственного опыта получили больше питательных веществ и обменной энергии, а также большее количество основных незаменимых аминокислот. Следует отметить, что подопытные животные, получавшие в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, получили большее количество питательных веществ, обменной энергии и основных незаменимых аминокислот,

по сравнению с подопытными животными, получавшими в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера.

Увеличение поедаемости объемистых кормов при соответствующем повышении продуктивности животных является положительным фактором, поскольку получить дополнительную продукцию без этого практически невозможно.

На основании оценки фактической поедаемости кормов было рассчитано суточное потребление энергии и ее использование подопытными животными (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Суточное потребление энергии и ее использование подопытными животными, МДж

Показатель	Группы		
	контрольная	I опытная	II опытная
Валовая энергия	129,3	141,1	144,7
Обменная энергия	75,5	82,7	84,8
Концентрация ОЭ, МДж/кг СВ	10,2	10,7	10,9
ОЭ на поддержание	31,5	31,1	30,1
ОЭ на синтез продукции	44,0	51,6	54,7
Энергия прироста	16,59	19,35	20,7
КПИ ОЭ	0,36	0,375	0,380

Из таблицы 5.6 видно, что замена части контрольного рациона экструдированными кормовыми продуктами, отразилась на обменных процессах в организме животных. Так, увеличение валовой энергии рациона опытных групп способствовало повышению обеспеченности обменной энергией.

Полученные данные свидетельствуют о том, что бычки I и II опытной группы с поступающим кормом получали валовой энергии на 8,4% и 10,6 % больше, чем бычки, получавшие контрольный рацион. Бычки II опытной группы получали валовой энергии на 2,5% больше, чем бычки I опытной группы.

У бычков II группы отмечено лучшее продуктивное использование обменной энергии.

Энергия прироста в I и II опытной группе была выше на 2,76 МДж – 14,3% и на 4,11 МДж – 19,8% по сравнению с контролем соответственно. Энергия прироста во II опытной группе была выше на 1,35 МДж – 6,5% по сравнению с I опытной группой.

Качество протеина экструдированных кормов по основным незаменимым аминокислотам, а также питательная и энергетическая ценность кормов отразились на приросте живой массы подопытных животных (таблица 5.7).

Как показали результаты взвешивания, среднесуточный прирост живой массы бычков, получавших в составе рациона экструдированные кормовые продукты, был выше по сравнению со среднесуточным приростом живой массы бычков, получавших контрольный рацион.

Таблица 5.7 – Продуктивное действие испытуемых кормов, кг.

Показатель	Группа		
	контрольная	I опытная	II опытная
Живая масса, кг:			
В начале опыта	225,4±3,89	225,1±3,91	225,3±3,91
В конце опыта	275,2±3,31	283,9±3,21	287,4±3,21
Абсолютный прирост, кг	49,8±4,52	58,8±4,46	62,1±4,46
Среднесуточный прирост, г	830±10,7	981±11,04	1035±9,5

Примечание: \*P<0,01

Среднесуточный прирост живой массы бычков I и II опытных групп отличался от контрольной группы соответственно на 15,3 % (P<0,01) и 19,8 % (P<0,01).

Высокие показатели среднесуточного прироста свидетельствуют о сбалансированности рационов. Однако следует отметить, что среднесуточный прирост живой массы бычков, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера был выше на 5,2 % по сравнению со среднесуточным приростом бычков, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера. Это свидетельствует о том, что рацион, в составе которого был кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-

экструдера, являлся более сбалансированным по питательным веществам и обменной энергии.

Во время постановки на опыт животные опытных групп, практически не различались по живой массе. Однако после двух месяцев скармливания изучаемых кормов между бычками подопытных групп по живой массе стали наблюдаться определенные различия.

Изучая динамику абсолютного прироста бычков, следует отметить, что абсолютный прирост в I и II опытной группе был выше на 9 кг (15,3%) и на 12,3 кг (19,8%), чем в контрольной группе. Лучшие показатели оказались во II группе, абсолютный прирост был больше на 3,3 кг (5,2%), чем в I опытной группе.

Следовательно, мясная продуктивность подопытных животных, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, была выше на 5,2 %, в отличие от подопытных животных, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера.

На основании проведенных исследований получен акт внедрения кормового продукта, экструдированного на разработанной конструкции пресс-экструдера (Приложение М).

## **5.6 Определение экономической эффективности**

### **5.6.1 Определение экономической эффективности от внедрения разработанной конструкции пресс-экструдера**

В работе были проведены испытания, направленные на изучение эффективности процесса производства экструдированных кормовых продуктов на разработанной и стандартной конструкции пресс-экструдера, для чего было проведено экструдирование зерновой смеси в составе ячменя, пшеницы и овса с получением конечного кормового продукта.

Параметры процесса производства кормового продукта приведены в таблице 5.2.

Рабочий период ОАО «Оренбургский комбикормовый завод» (г. Оренбург) составляет  $D = 236$  рабочих дней в году; при этом у предприятия есть возможность реализовать всю производимую продукцию [202].

Суточная мощность производства кормового продукта при 8 часовой работе цеха составит  $K_T = 2480$  кг (из них  $K^1_T = 248$  кг пшеницы,  $K^2_T = 1736$  кг ячменя,  $K^3_T = 471$  кг овса и  $K^4_T = 24,8$  кг соли) - кормового продукта экструдированного по стандартной технологии или  $K_{II} = 2880$  кг (из них  $K^1_{II} = 288$  кг пшеницы,  $K^2_{II} = 2016$  кг ячменя,  $K^3_{II} = 547$  кг овса и  $K^4_{II} = 28,8$  кг соли) - кормового продукта, экструдированного по предлагаемой технологии. Плановую численность работающих составляют 4 человека, из них 3 человека – рабочих, 1 человек – ИТР. Для производства кормового продукта по предлагаемой технологии, необходимо изготовление шнека для пресс-экструдера (ориентировочные затраты 70 тыс. руб. в ценах на 01.03.17 г.). Стоимость остального оборудования, из которого состоит линия, составит  $I = 1500$  тыс. руб. (балансовая стоимость на 01.03.2017 г.). Расчет произведен в ценах на 01.03.2017 г.

Себестоимость продукции:

1) Расходы на сырье:

а) стандартная технология:

Пшеница: годовой расход –  $\Gamma^1_T = D \cdot K^1_T = 236 \cdot 248 = 58528 \text{ кг} = 58,528 \text{ т}$ ;  
расходы на 1т –  $C^1_T = 7$  тыс. руб. С учетом расходов на транспортно-заготовительные работы (ТЗР=3%) годовая стоимость пшеницы составит  
 $Z^1_T = \Gamma^1_T \cdot C^1_T \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 58,528 \cdot 7 \cdot (100 - 3) / 100 = 397,4$  тыс. руб.

Ячменя: годовой расход –  $\Gamma^2_T = D \cdot K^2_T = 236 \cdot 1736 = 409696 = 409,696 \text{ т}$ ;  
расходы на 1т –  $C^2_T = 5$  тыс. руб. С учетом расходов на транспортно-заготовительные работы (ТЗР=3%) годовая стоимость ячменя составит  
 $Z^2_T = \Gamma^2_T \cdot C^2_T \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 409,696 \cdot 5 \cdot (100 - 3) / 100 = 1987$  тыс. руб.

Овёс: годовой расход –  $\Gamma^3_T = D \cdot K^3_T = 236 \cdot 471,2 = 111203 \text{ кг} = 111,203 \text{ т}$ ;  
расходы на 1т –  $C^3_T = 4$  тыс. руб. С учетом расходов на транспортно-заготовительные работы (ТЗР=3%) годовая стоимость овса составит  
 $Z^3_T = \Gamma^3_T \cdot C^3_T \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 111,203 \cdot 4 \cdot (100 - 3) / 100 = 431,46$  тыс. руб.

Соль: годовой расход

$$\Gamma^4_T = (\Gamma^1_T + \Gamma^2_T + \Gamma^3_T) \cdot 1 / 100 = (58,528 + 409,696 + 111,203) \cdot 1 / 100 = 5,8 \text{ т}$$

стоимость 1 т соли -  $C^4_T = 10$  тыс. руб. С учетом транспортно-заготовительных расходов (ТЗР=3%) годовая стоимость соли составит  
 $Z^4_T = \Gamma^4_T \cdot C^4_T \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 5,8 \cdot 10 \cdot (100 - 3) / 100 = 56,2$  тыс. руб.

Всего расходы на сырье:

$$Z_T = Z^1_T + Z^2_T + Z^3_T + Z^4_T = 397,4 + 1987 + 431,46 + 56,2 = 2872,06 \text{ тыс. руб. в год.}$$

б) предлагаемая технология:

Пшеница: годовой расход –  $\Gamma^1_П = D \cdot K^1_П = 236 \cdot 288 = 67968 \text{ кг} = 67,968 \text{ т}$ ;  
расходы на 1т –  $C^1_П = 7$  тыс. руб. С учетом расходов на транспортно-заготовительные работы (ТЗР=3%) годовая стоимость пшеницы составит  
 $Z^1_П = \Gamma^1_П \cdot C^1_П \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 67,968 \cdot 7 \cdot (100 - 3) / 100 = 461,5$  тыс. руб.

Ячменя: годовой расход –  $\Gamma^2_П = D \cdot K^2_П = 236 \cdot 2016 = 475776 \text{ кг} = 475,776 \text{ т}$ ;  
расходы на 1т –  $C^2_П = 5$  тыс. руб. С учетом расходов на транспортно-заготовительные работы (ТЗР=3%) годовая стоимость ячменя составит  
 $Z^2_П = \Gamma^2_П \cdot C^2_П \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 475,775 \cdot 5 \cdot (100 - 3) / 100 = 2307,5$  тыс. руб.

Овёс: годовой расход –  $\Gamma^3_П = D \cdot K^3_П = 236 \cdot 547,2 = 129139,2 \text{ кг} = 129,139 \text{ т}$ ;  
расходы на 1т –  $C^3_П = 4$  тыс. руб. С учетом расходов на транспортно-заготовительные работы (ТЗР=3%) годовая стоимость овса составит  
 $Z^3_П = \Gamma^3_П \cdot C^3_П \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 129,139 \cdot 4 \cdot (100 - 3) / 100 = 501,06$  тыс. руб.

Соль: годовой расход

$$\Gamma^4_П = (\Gamma^1_П + \Gamma^2_П + \Gamma^3_П) \cdot 1 / 100 = (67,968 + 475,776 + 129,139) \cdot 1 / 100 = 6,7 \text{ т}$$

стоимость 1 т соли -  $C^4_П = 10$  тыс. руб. С учетом транспортно-заготовительных расходов (ТЗР=3%) годовая стоимость соли составит  
 $Z^4_П = \Gamma^4_П \cdot C^4_П \cdot (100 - TPЗ) / 100 = 6,7 \cdot 10 \cdot (100 - 3) / 100 = 65,3$  тыс. руб.

Всего расходы на сырье:

$$Z_{II} = Z^1_{II} + Z^2_{II} + Z^3_{II} + Z^4_{II} = 461,5 + 2307,5 + 501,06 + 65,3 = 3335,4 \text{ тыс. руб. в год.}$$

2) Годовые расходы по выплатам з/п и отчислениям на социальное страхование при производстве по стандартной и предлагаемой технологии:

$$\Gamma_{\phi} = L \cdot 12 + O_c = 100 \cdot 12 + 432 = 1632 \text{ тыс. руб. в год}$$

где  $L$  - общая заработная плата, тыс. руб.

$O_c$  - отчисления по социальному страхованию (36 %) - 432 тыс. руб.

3) Амортизация:

а) стандартная технология:

Затраты на оборудование  $I_T = 1500$  тыс. руб. Амортизация (12 %) -  $A_{T.OB} = 180$  тыс. руб.

Амортизация производственного помещения -  $A_{T.П} = 120$  тыс. руб.

Всего:  $A_T = A_{T.П} + A_{T.OB} = 180 + 120 = 300$  тыс. руб.

б) предлагаемая технология:

Затраты на оборудование  $I_{II} = 1500 + 70 = 1570$  тыс. руб. Амортизация (12 %) -  $A_{II.OB} = 188$  тыс. руб.

Амортизация производственного помещения -  $A_{II.П} = 120$  тыс. руб.

Всего:  $A_{II} = A_{II.П} + A_{II.OB} = 188 + 120 = 308$  тыс. руб.

4) Затраты на воду

а) стандартная технология: для производства 1т кормового продукта необходимо  $P_B = 300$  л воды. В год потребность в воде для цеха составит:

$$P_{B.T} = D \cdot K_T \cdot P_B / 100 = 236 \cdot 2480 \cdot 300 / 100 = 1755845 \text{ л} = 175,584 \text{ м}^3;$$

стоимость 1 м<sup>3</sup> – 30 руб.

Затраты на воду за год составят  $\Gamma_{B.T} = 175,584 \cdot 30 / 1000 = 5,27$  тыс. руб. в год.

б) предлагаемая технология: для производства 1т кормового продукта необходимо  $P_B = 300$  л воды. В год потребность в воде для цеха составит:

$$P_{B.П} = D \cdot K_{II} \cdot P_B / 100 = 236 \cdot 2880 \cdot 300 / 100 = 2039040 \text{ л} = 203,904 \text{ м}^3;$$

стоимость 1 м<sup>3</sup> – 30 руб.

Затраты на воду за год составят  $G_{в.л} = 203,904 \cdot 30 / 1000 = 6,12$  тыс. руб. в год.

5) Затраты на электроэнергию

а) стандартная технология:

за год потребность в электроэнергии для производства экструдированных кормовых продуктов составит

$$G_{э.т} = D \cdot 10,5 \cdot 8 = 236 \cdot 10,5 \cdot 8 = 19824 \text{ кВт.}$$

Стоимость 1 кВт электроэнергии – 2,5 руб.

Затраты на электроэнергию составят  $\mathcal{E}_т = 2,5 \cdot G_{э.т} = 2,5 \cdot 19824 = 49,56$  тыс. руб.

в год.

б) предлагаемая технология:

за год потребность в электроэнергии для производства экструдированных кормовых продуктов составит

$$G_{э.п} = D \cdot 10 \cdot 8 = 236 \cdot 10 \cdot 8 = 18800 \text{ кВт.}$$

Стоимость 1 кВт электроэнергии – 2,5 руб.

Затраты на электроэнергию составят  $\mathcal{E}_п = 2,5 \cdot G_{э.п} = 2,5 \cdot 18800 = 47,2$  тыс. руб.

в год.

Всего затрат на производство экструдированных кормовых продуктов:

а) стандартная технология:

$$B_{з.т} = Z_т + G_ф + A_т + G_{в.т} + \mathcal{E}_т = 2872,06 + 1632 + 300 + 5,27 + 49,56 = 4858,89 \text{ тыс. руб. в}$$

год.

б) предлагаемая технология:

$$B_{з.п} = Z_п + G_ф + A_п + G_{в.п} + \mathcal{E}_п = 3335,4 + 1632 + 308 + 6,12 + 47,2 = 5328,8 \text{ тыс. руб. в}$$

год.

б) Себестоимость 1 т. составит:

а) стандартная технология  $T_т = B_{з.т} / (D \cdot K_т) = 4858,89 / (236 \cdot 2,48) = 8,3$  тыс. руб.

б) предлагаемая технология  $T_п = B_{з.п} / (D \cdot K_п) = 5328,8 / (236 \cdot 2,88) = 7,8$  тыс. руб.

7) Расчет годовой стоимости продукции:

а) стандартная технология: выход готовой продукции,  $B_т = 321,9$  кг/ч

годовая стоимость продукции:

$$H_T = D \cdot B_T \cdot 8 \cdot 16 = 236 \cdot 321,9 \cdot 8 \cdot 12 = 7292966,4 \text{ руб} = 7292,966 \text{ тыс.руб}$$

б) предлагаемая технология: выход готовой продукции,  $B_{II} = 373,1 \text{ кг/ч}$   
годовая стоимость продукции:

$$H_{II} = D \cdot B_{II} \cdot 8 \cdot 16 = 236 \cdot 373,1 \cdot 8 \cdot 12,5 = 8805160 \text{ руб} = 8805,16 \text{ тыс.руб}$$

8) Расчет прибыли от реализации продукции:

а) стандартная технология:  $\Pi_T = H_T - B_{3,T} = 7292,966 - 4858,89 = 2434,076 \text{ тыс.}$   
руб. в год.

б) предлагаемая технология:  $\Pi_{II} = H_{II} - B_{3,II} = 8805,16 - 5328,8 = 3476,36 \text{ тыс.}$   
руб. в год.

9) Экономическая эффективность (рентабельность):

а) стандартная технология

$$РП_T = (\Pi_T / H_T) \cdot 100 = (2434,076 / 7292,966) \cdot 100 = 33,4 \%$$

б) предлагаемая технология

$$РП_{II} = (\Pi_{II} / H_{II}) \cdot 100 = (3476,36 / 8805,16) \cdot 100 = 39,5 \%$$

10) Определение срока окупаемости:

а) стандартная технология  $CO_T = I_T / \Pi_T = 1500 / 2434,076 = 0,6 \text{ года};$

б) предлагаемая технология  $CO_{II} = I_{II} / \Pi_{II} = 1570 / 3476,36 = 0,45 \text{ года.}$

11) Расчет затрат на один рубль товарной продукции:

а) стандартная технология  $M_T = B_{3,T} / \Pi_T = 4858,89 / 2434,076 = 1,9 \text{ руб.};$

б) предлагаемая технология  $M_{II} = B_{3,II} / \Pi_{II} = 5328,8 / 3476,36 = 1,53 \text{ руб.}$

Таким образом, расчет экономической эффективности показывает, что внедрение на предприятии разработанной конструкции пресс-экструдера позволяет:

- увеличить прибыль:

$$\Pi = (\Pi_{II} - \Pi_T) = (3476,36 - 2434,076) = 1042,2 \text{ тыс. руб. или } 29 \%$$

- снизить срок окупаемости:

$$CO = CO_T - CO_{II} = 0,6 - 0,45 = 0,15 \text{ года или } 25 \%$$

- повысить рентабельность:

$$РП = РП_{II} - РП_T = 39,5 - 33,4 = 6,1 \%$$

- снизить затраты на один руб. товарной продукции:

$$M = M_T - M_{II} = 1,9 - 1,53 = 0,37 \text{ руб. или } 19,5 \%$$

### 5.6.2 Определение экономической эффективности применения экструдированных кормов для кормления бычков, выращиваемых на мясо

Для определения эффективности применения экструдированного кормового продукта при откорме бычков выращиваемых на мясо, был проведен экономический расчет.

В процессе расчета экономической эффективности применения кормов, экструдированных на стандартной и разработанной конструкции, учитывались затраты за период научно-хозяйственного опыта, в ценах на 2017 г. (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Экономическая эффективность выращивания бычков в научно-хозяйственном опыте (в расчете на 1 голову)

Показатели	Группы		
	контрольная	I опытная	II опытная
Валовый прирост живой массы, кг	49,8	58,8	62,1
Сумма от условной реализации, руб.	4482	5292	5589
Затраты на прирост, руб:			
- стоимость кормов	3102	3634	3754
- заработная плата	150	150	150
- амортизация	216	216	216
- прочие прямые и косвенные затраты	373,1	352,4	364,5
Всего затрат, руб.	3841,1	4352,4	4484,5
Себестоимость одного кг прироста, руб.	77,1	74	72,2
Прибыль от условной реализации, руб.	640,9	939,6	1104,5
Дополнительная прибыль по сравнению с контролем, руб	-	298,7	463,6

Один из основных показателей, характеризующий экономическую эффективность выращивания молодняка – себестоимость 1 кг прироста живой массы, которая в I и II опытной группе меньше на 3,1 руб. и 4,9 руб., чем в контрольной.

Фермерское хозяйство реализует мясо непосредственно по договорной цене, которая находится в пределах 90-110 руб. за кг.

Если принять за реализационную стоимость 90 руб. за 1 кг, то от каждого бычка II опытной группы будет получена дополнительная прибыль в размере 463,6 руб. по сравнению с контролем. Полученные в результате экономических расчетов данные эффективности применения экструдированных кормовых продуктов, свидетельствуют об экономической эффективности производства. Так замена части рациона молодняка крупного рогатого скота кормовым продуктом, экструдированным на стандартной и разработанной конструкции, позволила снизить себестоимость производства прироста живой массы на 4,2 % и 6,8 % по сравнению с контролем и увеличить прибыль на 298,7 и 463,6 руб. на голову соответственно. При замене части рациона КРС кормовым продуктом, экструдированным на разработанной конструкции на 2,5% снижается себестоимость производства прироста живой массы и увеличивается прибыль на 165 руб. на голову, в отличие от кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции.

### **Выводы по пятой главе**

1. Предложена усовершенствованная конструкция пресс-экструдера с изменяющимися непосредственной в процессе работы параметрами шнека, включающая измерительные системы, позволяющие контролировать и снимать данные протекающего процесса.

2. С целью обоснования разработанной конструкции проведены контрольные испытания производства экструдированных кормовых продуктов на ОАО «Оренбургский комбикормовый завод» (г. Оренбург) на пресс-экструдере стандартной и разработанной конструкции, которые показали, что применение пресс-экструдера с параметрами шнека изменяющимися непосредственно в процессе работы, позволяет снизить удельные затраты энергии на процесс производства кормовых продуктов на 16 %, повысить производительность пресс-

экструдера на 16 %, комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта на 11,5 %, комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта на 3%. На основании проведенных испытаний получен акт внедрения разработанной конструкции пресс-экструдера на ОАО «Оренбургский комбикормовый завод».

3. На основании экспериментальных данных разработано программное средство «Критериальная оценка эффективности технологии экструдирования белково-крахмало-клетчаткосодержащего сырья», позволяющее определить эффективность технологии экструдирования кормовых продуктов.

4. Результаты исследования изменения продуктивного действия и энергетической ценности кормов в процессе экструзионной обработки показали, что кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, обладает большей энергетической на 1,6 % и питательной ценностью на 3,6 %, и более качественным протеином по основным незаменимым аминокислотам: лизина больше на 5%, метионина – на 1,4%, триптофана – на 5,6 %, в отличие от кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции пресс-экструдера, что является важным фактором, определяющим продуктивность животных.

5. Проведенные исследования по оценке перевариваемости экструдированных кормовых продуктов и неэкструдированной зерновой смеси в рубце крупного рогатого скота показали, что компоненты экструдированных кормовых продуктов отличаются от неэкструдированной зерновой смеси большей способностью распадаться в пищеварительном тракте до простых веществ, усваиваемых организмом. Вместе с тем, кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера имеет более высокую перевариваемость питательных веществ на 6,9 %, а, следовательно, большую продуктивную ценность, в отличие от кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции пресс-экструдера.

6. Энергия прироста бычков, получавших в составе рациона экструдированные кормовые продукты, была выше на 2,76 МДж – 14,3 % и на

4,11 МДж – 19,8 % по сравнению с контролем соответственно. Вместе с тем, энергия прироста бычков, получавшей в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, была выше на 1,35 МДж – 6,5 % по сравнению бычками, получавшей в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера.

Среднесуточный и абсолютный прирост живой массы бычков, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера был выше на 5,2 % по сравнению со среднесуточным приростом бычков, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера.

На основании проведенных исследований получен акт внедрения кормового продукта, экструдированного на разработанной конструкции пресс-экструдера в ООО МТС «Красногоры».

7. Расчет основных технико-экономических показателей выявил, что внедрение на предприятии разработанной конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека, позволит увеличить прибыль на 29 %, снизить срок окупаемости на 25 %, снизить затраты на один руб. товарной продукции на 19,5 %, повысить рентабельность на 6,1%.

Расчет экономической эффективности применения экструдированных кормов для кормления бычков, выращиваемых на мясо показал, что при замене части рациона крупного рогатого скота кормовым продуктом, экструдированным на разработанной конструкции на 2,5% снижается себестоимость производства прироста живой массы и увеличивается прибыль на 165 руб. на голову, в отличие от кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретически обоснована предлагаемая конструкция пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека. Установлено, что для предлагаемой конструкции пресс-экструдера с внутренним диаметром шнековой камеры  $D_{\text{шк}} = 0,06$  м и рабочей длиной шнека  $H_{\text{р.шн.}} = 0,65$  м целесообразно установить устройства для измерения крутящих моментов на расстоянии 0,08 м, 0,3 м и 0,6 м от загрузочного устройства и выполнить шнек пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы шагом и углом наклона витков в зоне загрузки и плавления.

Разработанная математическая модель позволяет учесть реологические свойства перерабатываемого материала на двух этапах: пластификации материала и его дозирования.

2. Установлены зависимости параметров экструдруемого материала от параметров технологического процесса: зависимость динамического коэффициента трения от отношения шага винтовой лопасти шнека, крутящего момента в зоне загрузки и температуры сырья на входе в экструдер (уравнение 4.3) и зависимость модуля упругости и вязкости от отношения шага винтовой лопасти шнека, крутящего момента в зоне плавления и температуры перерабатываемого материала (уравнение 4.10) позволяют наиболее полно учесть особенности перерабатываемого материала в разработанной математической модели.

Проведенные экспериментальные исследования по изучению влияния параметров технологического процесса на физико-химические параметры и на изменение химического состава перерабатываемого материала в процессе экструзии показали, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру можно значительно снизить полное напряжение в перерабатываемом материале до 7,4 МПа, а также повысить плотность перерабатываемого материала в канале шнека пресс-экструдера до 1400 кг/м<sup>3</sup>, что позволит получать экструдированный кормовой продукт высокого качества в

соответствие с техническими требованиями ГОСТ Р 51899-2002 «Корма гранулированные. Общие технические условия» и снизить затраты энергии на производство.

Результаты исследования химического состава экструдированного материала показали, что при производстве экструдированных кормовых продуктов на разработанной конструкции шнека пресс-экструдера происходят глубокие химические преобразования в перерабатываемом материале, в результате которых увеличиваются энергетическая на 7,3% и питательная на 15,6 % ценность кормового продукта и наиболее важные для сельскохозяйственных животных незаменимые аминокислоты: лизин на 11,2 %, метионин на 3,6 % и триптофан на 21%.

3. Определены оптимальные режимы и параметры процесса экструдирования кормовых продуктов, обеспечивающие снижение энергоемкости и повышение качества готового кормового продукта: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру 0,77–0,81, частота вращения шнека 171 – 174 об/мин, температура сырья на входе в экструдер  $t=20$  0С.

4. Разработанная энергосберегающая конструкция одношнекового пресс-экструдера (патент РФ №2548980) с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека обеспечивает снижение энергоемкости процесса экструдирования на 16 % по сравнению со стандартной конструкцией и повышение качества готового кормового продукта: комплексный показатель физико-химических свойств на 11,5% и комплексный показатель органолептических свойств на 3%.

5. Поставлен научно-хозяйственный опыт, результаты которого показали, что кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, обладает большей энергетической на 2% и питательной ценностью на 3,6 % и более качественным протеином в отличие стандартной конструкции пресс-экструдера. Среднесуточный и абсолютный прирост живой массы бычков, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера был выше на 5,2 % по сравнению с

бычками, получавшими в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера.

6. Дана оценка экономической эффективности разработанной конструкции шнека пресс-экструдера, которая показала, что внедрение на предприятии разработанной конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека, позволит увеличить прибыль на 29 %, снизить срок окупаемости на 25 %, снизить затраты на один руб. товарной продукции на 19,5 %, повысить рентабельность на 6,1%.

При замене части рациона крупного рогатого скота кормовым продуктом, экструдированным на разработанной конструкции на 2,5% снижается себестоимость производства прироста живой массы и увеличивается прибыль на 165 руб. на голову, в отличие от кормового продукта, экструдированного на стандартной конструкции.

### **ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ**

Для снижения энергоемкости процесса экструзии и повышения качества экструдированных кормовых продуктов рекомендуем применять разработанную конструкцию шнека с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами. Оптимальными режимами экструдирования для производства кормовых продуктов из зернового сырья являются: отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру 0,77–0,81, частота вращения шнека 171 – 174 об/мин, температура сырья на входе в экструдер  $t=20$  °С.

Для увеличения мясной продуктивности крупного рогатого скота рекомендуем использовать экструдированные кормовые продукты, полученные на разработанной конструкции шнека пресс-экструдера с применением оптимальных параметров процесса экструдирования.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

Дальнейшие исследования целесообразно проводить для выявления влияния состава и свойств различных не зерновых материалов, подвергаемых экструдированию, на конструктивные особенности пресс-экструдеров с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мясное скотоводство. Под. Ред. Зелепухина А.Г. и Левахина В.И. – Оренбург.: Издательство ОГУ, 2000. – 350 с. ISBN 5-7410-0579-9.
2. Баканов В.Н., Менькин В.К. Кормление сельскохозяйственных животных. – М.: Агропромиздат, 1989. – 511 с.
3. Свиридова, Т.М. Закономерности обмена веществ, энергии и формирования мясной продуктивности у молодняка мясного скота: Монография – Москва, 2003. – 312 с.
4. Груздев Н.В., Полежаев В.В. и др. Эффективность использования протеина из рационов с различной концентрацией энергии // Оценка и нормирование протеинового питания жвачных / Тез. докл. Всесоюз. совещания. – Боровск, 1989. – С. 21-22.
5. Куприянов, А.В. Разработка технологии производства и оценка качественных показателей кормового продукта, полученного методом соэкструзии из отходов пивоваренных предприятий: дис. ... канд. с/х наук: 06.02.02 / Алексей Викторович Куприянов. – Оренбург, 2008. – 138 с.
6. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А.П.Калашников, В.И.Фисицин, В.В.Щеглов, Н.И.Клейменов // Справочное пособие. - М., 2003. - С.152.
7. Куликов В.М., Рубан Ю.Д. Общая зоотехния. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1982. – 560 с.
8. Галлиев Б.Х. Ефремова Л.В., Прибылов В.Д. Эффективность откорма бычков при различных условиях содержания // Пути интенсификации производства говядины в мясном скотоводстве / Тр. ВНИИ мясного скотоводства. – Оренбург, 1990. – С. 41-45.
9. Галлиев Б.Х. Ефремова Л.В., Прибылов В.Д. Кормовая добавка при балансировании рационов // Пути интенсификации производства говядины в мясном скотоводстве /Тр. ВНИИ мясного скотоводства.–Оренбург,1990.–С. 92-96.

10. Герасимова Б.Л., Нефедова Н.Н., Невидомская А.Ф. Нормы кормления телят мясных пород при интенсивном выращивании // Сб. науч. тр. ВНИИ мясного скотоводства. – Оренбург, 1985. С. 37-43.
11. Герасимов Б.Л., Галив Б.Х., Ефремова Л.В., Прибылов В.Д. Влияние детализированных норм на продуктивность бычков при силосно-сенажном типе кормления // Интенсификация мясного скотоводства и производства говядины / Тр. ВНИИ мясного скотоводства. – Оренбург, 1988. – С. 54-58.
12. Герасимов Б.Л., Пирс Я.В., Федоринова М.К., Старых И.Л. Использование комбикормов местного производства в животноводстве // Интенсивные технологии производства говядины / Тр. ВНИИ мясного скотоводства, 1989. – С. 73-76.
13. Дусаева Х.Б. Использование питательных веществ и энергии рационов с различным энергопротеиновым отношением бычками симментальской породы, выращиваемых на мясо // Автореф. дис. ... соиск. учен. степ. канд. с-х. наук. – Оренбург, 1994. – 24 с.
14. Кернев А.В., Ильинский А.В. Прогноз перевариваемости сырого протеина у молодняка крупного рогатого скота // Тез. докл. Всесоюз. совещания. – Боровск, 1990. – 37 с.
15. Кребс Г., Корнберг Г. Превращение энергии в живых системах // Изд. иностранной литературы. – М., 1959.
16. Курилов Н.В. и др. Изучение пищеварения у жвачных/ Методические указания / ВНИИФБиП с.-х. животных. – Боровск, 1987.
17. Ланина А.В. Формирование мясных качеств крупного рогатого скота // Автореф. дис. ... соиск. учен. степ. докт. с-х. наук. – М., 1962. – 61 с.
18. Маркелова В.Н., Фомичёв Ю.П., Никанова Л.А. Химический состав экструдированного зерна зерновых, зернобобовых и масличных культур / Кормопроизводство. – М., 2014. – № 9. – С. 41-44.
19. Арсений Н. М. и Шариков А. Ю. Влияние экструзии на сохранность аминокислот и пищевую ценность белка / Вопросы питания.–2015.–№3.– С. 13-21.

20. Шевцов Н.Н., Зуев Н.П. и Наумов М.М. Молочная продуктивность коров при скармливании комбикормов-концентратов с включением экструдированных компонентов / Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. - №12. – С. 100-104.

21. Шмалько Н.А., Беликова А.В. и Росляков Ю.Ф. Использование экструдированных продуктов в хлебопечении / Фундаментальные исследования. – 2007. – № 7 – С. 90-92.

22. Зверкова, З. Н. Эффективность использования зерна озимой ржи при кормлении крупного рогатого скота: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.02.08 / Зверкова, Зинаида Николаевна. – М., 2010. – С. 117.

23. Трутнев М.А. Рекомендации по производству и скармливанию экструдированного зерна озимой ржи. – Пермь, 2012. – 28 с.

24. Бадмаев Н. А. и Арилов А. Н. Влияние зерносмеси до и после экструзии и селеносодержащих препаратов на мясную продуктивность баранчиков / Научная статья. – 2016. - №1. – С. 51-55.

25. Швецов Н. Н., Зуев Н. П., Наумов М. М. и др. Влияние комбикормов-концентратов с экструдированным зерном на рубцовое пищеварение дойных коров / Научная статья. – 2014. - №9. – С. 72-77.

26. Sellar K. Technische faktoren und deren bedeutung – furdie extrusion von lebensmitteln / K. Sellar // Cordian. – 1982. - № 7. – P. 176-178.

27. Атыханов, А.К. Оптимизация процесса экструдирования при производстве комбикормовых добавок для жвачных животных: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Атыханов Амбек Кашкымбаевич. – Алма-Ата: КазСХИ, 1984. - 203 с.

28. Новиков, В.В. Исследование рабочего процесса и обоснование параметров пресс-экструдера для приготовления карбамидного концентрата: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01/Владимир Васильевич Новиков.–Саратов,1981–157 с.

29. Денисов, С.В. Повышение эффективности приготовления кормосмеси на основе стебельчатого корма и обоснование параметров пресс-экструдера: дис.

...канд. техн. наук: 05.20.01 / Денисов Сергей Владимирович. – Самара, 2006. – 142 с.

30. Петров, В.В. Повышение эффективности приготовления комбикормов-концентратов путем оптимизации параметров пресс-экструдера: дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / В.В. Петров. – Санкт – Петербург, 1999. – 134 с.

31. Чернов, Н.П. Производство карбамидного концентрата / Н.П. Чернов. – М.: Колос, 1980, - 138 с.

32. Шенкель, Г. Шнековые прессы для пластмасс. Принцип действия, конструирование и эксплуатация / Г. Шенкель. – Л.: Гос. Науч. – техн. изд-во хим. лит-ры, 1962. – 468 с.

33. Выгодин, В.А. Экструзионная техника и технология: состояние, перспективы / В.А. Выгодин, В.Л. Касперович, Г.Б. Зинюхин, В.П. Попов, В.А. Буцко // Пищевая промышленность. – 1995. - №7. – С. 4-6.

34. Урьев, Н.Б. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс / Н.Б. Урьев, М.А. Талейсник. – М.: Пищевая промышленность, 1994. - 240 с.

35. Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 216 с.

36. Кукта, Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г.М. Кукта. – М.: Агропропиздат, 1987. – 303 с.

37. Van Zuilichem D.j., Stolp W. Survey of the present extrusion cooking techniques in the food and confectionary industry / Proc. Europ. Conf.: Extrusion Technology for the Food Industry. - 1986. - P. 1-15.

38. Набил, В. Саид. Экструдеры «Инста - Про» в производстве комбикормов / В. Саид. Набил // Комбикормовая промышленность. – 1998. - №4. – С. 17-18.

39. Сагитов, Р.Ф. Анализ российского рынка экструзионной техники для химической промышленности / Р.Ф. Сагитов, С.Ю. Соловых, С.В. Антиминов, В.П. Ханин, Д.В. Тимофеева // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы 5-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с

международным участием (24-26 мая 2012 г., г. Бийск) в 2-х ч. Ч.1 / Алт. гос. техн. ун-та, 2012 – С. 100 – 104.

40. Тимофеева, Д.В. Анализ российского рынка экструзионной техники для пищевой промышленности / Д.В. Тимофеева, Н.Н. Мартынов, С.В. Антимонов // Молодежь как импульс в техническом прогрессе: материалы III международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников. – Самара – Оренбург: СамГУПС, 2015. – 278-280.

41. Малышев, П.Н. Исследование насосной зоны быстроходного червячного пресса: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13/П.Н. Малышев. – Л., 1967.–32 с.

42. Дидык, Т.А. Повышение эффективности технологического процесса и обоснование параметров шнекового пресса для экструдирования зернового материала: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Дидык Татьяна Анатольевна. – Саратов, 2006. – 172 с.

43. Ханин, В.П. Ресурсосберегающий процесс экструзионной обработки зернового сырья: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ханин Виктор Петрович. - Оренбург: ОГУ, 1999. - 130 с.

44. Силин, В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных механизмах / В.А. Силин.— М.: Машистроение, 1972.—147 с.

45. Черняев, Н.П. Производство карбамидного концентрата / Н.П. Черняев, А.Н. Борисенко, Б.В. Касьянов и др. // Под ред. Н.П. Черняева. – М.: Колос, 1980. – 160с.

46. Юрьев, В.П. Функциональные свойства базовых экструзионных продуктов. Использование системно аналитического подхода и модельных представлений о механизме процесса термопластической экструзии при разработке новых рецептур / В.П. Юрьев, А.Н. Богатырев, В.Т. Дианова // Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование. – М.: Ступень, 1994. – С. 44-55.

47. Гиберов, З.Г. Механическое оборудование заводов пластических масс / З.Г. Гиберов. – М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.

48. Морозов, М.Н. Разработка и исследование экструзионного агрегата на базе одношнекового экструдера для получения и переработки композиционных полимерных материалов: дисс. ... канд, техн. наук: 05.04.09 / Михаил Никитович Морозов. – М., 1984. – 181 с.

49. Соколов, А.Я. Прессы пищевых и кормовых производств / А.Я. Соколов, М.Н. Караваев, Д.М. Руб, Ц.Р. Зайчик // под ред. А.Я. Соколова. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.

50. Миллауэр, Х. Экструдеры и экструзионные установки / Х. Миллауэр // Семинар по технологии производства комбикормов: тез. докл. – М., 1989. – 23 с.

51. Витюк, Л.А. Совершенствование процесса производства полуфабрикатов чипсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Витюк Лада Александровна. – М., 1999. – 27 с.

52. Насыров, А.Ш. Моделирование процесса экструдирования как объекта управления при переработке материалов растительного происхождения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Александр Шакурович Насыров. – Оренбург, 2004. – 178 с.

53. Кобылинская, Е.В. Изменение состава углеводов вследствие экструзионной обработки крахмала / Е.В. Кобылинская, В.Н. Ковбаса // 2 Международная научно-техническая конференция: «Техника и технология пищевых производств», Могилев. – 2000. – С. 264-265.

54. Тимофеева, Д.В. Оптимизация изменения агрегатного состояния сырья в процессе экструзии / Д.В. Тимофеева, А.Г. Зинюхина, В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. - № 3. – С. 225-229.

55. Тимофеева, Д.В. Оптимизация процесса преобразования агрегатного состояния зернового сырья при экструзионной обработке / Д.В. Тимофеева, В.Г. Коротков, В.П. Попов, С.В. Антимонов // Хлебопродукты. – 2013. - № 8. – С. 46-48.

56. Тимофеева, Д.В. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.П. Попов, С.В. Антимонов, А.Г. Зинюхина //

Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. - № 9 (170). – С. 220-225.

57. Тимофеева, Д.В. Разработка технологии экструдированных продуктов с учетом адгезионно-когезионных технологий / Д.В. Тимофеева, В.П. Попов, Н.В. Белов, А.Г. Белова, Е.В. Ганин // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции / МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2013 - С. 75-177.

58. Берман, Г.К. Течение вязко-пластичных масс по коническому каналу / Г.К. Берман, Ю.А. Мачихин // Известия вузов, Пищевая технология. – 1972. – № 5. - С. 122-124.

59. Dekker J. Verbesserte schneckenkonstruktion fur das extrudieren von polypropylen / Kunststoffe. - 1976. - № 66. - P. 130-135.

60. Fahey, T.E., M.Sc. Thesis, Case Western Reserve Univ., September (1981).

61. Gale, G.M., *Plastics and Polymer*, 6, 183 (1970).

62. Guy, R.G.E. Extrusion and co-extrusion of cereals. - in food structure-its creation and evaluation / R.G.E. Guy, A.W. Horne // Eds. J.M.V. Blanshard, J.R. Mitchell. - Butterworths: Elsevier Applied Science Publishers. - 1988. - ch. 18. - P. 331-349.

63. Попов, В.П. Разработка технологии производства сухих полуфабрикатов крекеров с использованием варочных экструдеров: автореф. ... канд. техн. наук: 05.18.01 / Валерий Павлович Попов. – М., 1995. – 24 с.

64. Антимонов, С.В. Оптимизация технологии экструдированных грубых кормов и добавок / С.В. Антимонов, В.Г. Коротков, В.П. Попов, Е.В. Ганин, С.В. Кишкилев // Материалы IX международной научно- практической конференции «Научный вестник», Прага. Publishing House «Education and Science» s.r.o. – 2013 г. – С. 72-76. – ISBN 978-966-8736-05-6.

65. Берман, Г.К. Течение вязко-пластичных пищевых масс в предматричной камере шнекового пресса / Г.К. Берман, Ю.А. Мачихин, Л.Н. Лунин // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1972. – № 3. - С. 18-20.

66. Гришаев, И.Г. Оборудование для механических процессов химической технологии: учебное пособие / И.Г. Гришаев, В.И. Назаров. – М.: МИХМ., 1989 – 88 с.
67. Бондарева, И.А. Совершенствование процесса гранулирования комбикормов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бондарева И. А. – М., 1985. - 22 с.
68. Макаров, Е.С. Определение параметров процесса экструдирования кормов и разработка методики расчета пресс-экструдера: дис. ... канд. техн. наук / Е С Макаров – М ., 1985. – 207 с.
69. Вешкин, А.И. Интенсификация процесса получения саго из крахмала экструзионным способом: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Вешкин Александр Иванович. – М., 1990. - 180 с.
70. Севостьянов, М.В. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование / Н.Н. Дублин, С.А. Михайличенко, М.В. Севостьянов // «Строительные материалы». – 2004. - № 11. С. 2-5.
71. Спандиаров, Е. Разработка и совершенствование процессов и оборудования производства комбикормов: дис. ... докт. техн. наук / Е. Спандиаров. - М.: МГАПП, 1994. - 339 с.
72. Жислин, Я.М. Оборудование для производства комбикормов, обогатительных смесей и премиксов / Я.М. Жислин. – М.: Колос, 1981. – 319 с.
73. Judson, M. Harper Extrusion of Foods: Volume II / M. Harper Judson. - Boca Raton, Florida: CRC Press, 1981. - 212 p.
74. Астарита, Д. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Д. Астарита, Д. Маруччи; перевод с английского под ред. Ю.А. Буевича. - М.: Мир, 1978. – 309 с.
75. Klenk, P. Plastifiziermodelle für die verarbeitung benetzender und nichtbenetzender thermoplaste auf einschnecken extruden / P. Klenk // Rheologica Ada. - 1968. - № 7. - P. 75-78.
76. Мартыненко, Я.Ф. Промышленное производство комбикормов / Я.Ф. Мартыненко. – М.: Колос, 1975. – 216 с.

77. Kulas, F.R. PVC powder extrusion. melting properties and particle morphology / F.R. Kulas, N.P. Thorshaug // Material journal of applied polymer science. - 1979. - № 6. - P. 1781-1794. - 0021-8995 / JAPNA.

78. Жушман, А.Н. Изменение свойств и структуры кукурузных крахмалов и муки при экструзионной обработке / А.И. Жушман, В.Г. Карпов, П.А. Иващенко // Сахарная промышленность. – 1985. - №3 – С. 39-42.

79. Богатырев, А.Н. Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование / А.Н. Богатырев; под ред. А.Н. Богатырева, В.Л. Юрьева. – М.: Ступень, 1994. – 200 с.

80. Бурцев, А.В. Современная техника и технология термопластической экструзии в производстве «сухих завтраков» / А.В. Бурцев, В.А. Грицких, Г.И. Касьянов. – Краснодар: Экоинвест, 2004. – 112 с. – ISBN 5-94215-033-8.

81. Остриков, А.Н. Современное состояние и основные направления совершенствования экструдеров / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, В.Н. Василенко, К.В. Платов. – М.: ООО «Полиграфсервис», 2004. – 41 с.

82. Медведев, Г.М. Разработка новых видов экструдированных сухих завтраков. Обзорная информация / Г.М. Медведев. – М.: ЦНИИТЭИ Хлебпродинформ, 1995. – 18 с.

83. Буров, Л.А. Технологическое оборудование макаронных предприятий / Л.А. Буров, Г.М. Медведев. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 248 с.

84. Назаров, Н.И. Технология макаронных изделий / Н.И. Назаров. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 287 с.

85. Титова, Г.П. Производство сухих завтраков в США / Г.П. Титова // М.ЦНИИЕЭК Пищепром СССР, 1979. – вып. 13. – 24 с.

86. Seller, K. Rohstoffe fur extrudate zum anfbad vor riegeln / K. Seller // Cordian. – 1985. - № 4. - P. 60-64.

87. Seller, K. Rohstoffe und extrusion. Verhoiten ligiger rohstoffe und cetreidebasses wahrenddes extrusionsprozess / K. Seller // Cordian – 1980. - № 10. - P. 235-242.

88. Schneeweiß, R. Die extrusion ein technologisches verfahren zur herstellung von lebensmitteln / R. Schneeweiß, E. Maack, W. Schneille // Lebensmittelindustrie. – 1983. - №3. P. 391 – 396.

89. Клейменов, В.Н. Экструдирование зерновых кормов / В.Н. Клейменов, К.Б. Вартанов // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства ВНИИ электрификации сельского хозяйства, 1984. – 152 с.

90. Пресс-экструдеры для получения полноценных кормов и кормовых добавок // Техника и оборудование для села. – 2002. - №1. С. 12.

91. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика - новая область науки / П.А. Ребиндер. - М.: Знание, 1958. - 64 с.

92. Реометрия пищевого сырья и продуктов: справочник / Под ред. Ю.А. Мачихина. - М.: Агропромиздат, 1990. - 271 с.

93. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос; пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

94. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М.: Химия, 1977. – 464 с.

95. Юрьев, В.П. Физико-химические основы получения экструзионных продуктов на основе растительного сырья / В.П. Юрьев, А.Н. Богатырев // Вестник сельскохозяйственной науки, № 12, 1991.- С. 43-51.

96. Засыпкин, Д.В. Исследование структуры и свойств текстуратов, полученных термопластической экструзией некоторых белков, полисахаридов и их смесей / Д.В. Засыпкин, В.П. Юрьев, В.Б. Толстогузов // Химия пищевых веществ. Свойства и применение биополимеров в пищевых продуктах. Тез. докл. Всесоюз. научн. конф. 1990 г. – Могилев, 1990 г. – С. 22.

97. Menges G. Ingenieurmäßige festigkeitsrechnung für spritzgussteile aus thermoplasten / G. Menges, P. Klenk // Kunststoffe. - 1967. - № 57. - P. 2-8.

98. Карабуля, Б.В. Экструзионная технология – перспективный способ создания новых пищевых продуктов / Б.В. Карабуля. – Кишинев: Молд-НИИНТИ, 1989. – С. 1-26.

99. Карпов, В.Г. Получение набухающих крахмалопродуктов экструзионным методом: дисс. ... канд. техн. наук: 0.5.18.05 / В.Г. Карпов. – М., 1981. – 158 с.
100. Yuryev V.P., Likhodzievskaya I.B., Zasyplin D.V., Alexeev V.V., Grinberg V.Ya., Polyakov V.I., Tolstoguzov V.B. Investigation of the microstructure of textured proteins produced by thermoplastic extrusion / *Nahrung*. - 1989. – Vol. 33. - № 9. - P. 823 – 830.
101. Кошелев, А.Н. Производство комбикормов и кормовых смесей / А.Н. Кошелев, Л.А. Глебов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 175с.
102. Kiriakidis, D.G. A study of stress distribution in contraction flows of an LLDPE melt / D.G. Kiriakidis, H.J. Park, E. Mitsoulis, B. Vergnes, J-F Agassant // *J Non-Newtonian Fluid. Mech.* - 1993. - № 47. - P. 339–356.
103. Wang, Y., *Polym. Eng. Sci.*, 3, p. 204 (1991).
104. Darnell W.H., Mol E.A.J. Solids conveying in extruders / *Society of Plastics Engineers Journal*. - 1956. - №12. - P. 20-29.
105. Оспанов, А.А. Основы теории и моделирование процессов измельчения сыпучих масс / А.А. Оспанов, Н.В. Остапчук. – Алма-Ата.: Галым, 1992. – 244 с.
106. Lillford, P.J. Texturization of proteins. – in food structure – its creation and evaluation / P.J. Lillford; eds. J.M.V. Blanshard, J.R. Mitchell // Butterworths: Elsevier Applied Science Publishers. - 1988. - ch. 8. – P. 355 -384.
107. Полищук, В.Ю. Особенности шнекового прессующего механизма экструдера / В.Ю. Полищук // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 1993. - №5. – С.19.
108. Попов, В.П. Разработка технологии экструдированных кормов на основе отходов пищевой промышленности с охлаждением двухкратно измельчаемого сырья / В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов, С.В. Кишкилев // «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием); Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013 г. - С. 1038-1041.

109. Попов, В.П. Технология получения экструдированных кормов с применением гречишной и подсолнечной лузги / В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых, С.В. Кишкилев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2013 г. - № 4.- С. 47-49. - ISSN 2072-9669.

110. Юрьев, В.П. Физико-химические основы получения экструзионных продуктов питания / В.П. Юрьев, Д.В. Засыпкин, А.Н. Богатырев // Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование. – М.: Ступень, 1994. – С.5-24

111. Yuryev V.P., Zasyupkin D.V., Alexeev V.V., Ghenin Ya.V., Ezernitskaya M.G., Tolstoguzov V.B. Structure of protein texturates obtained by thermoplastic extrusion / Narung. - 1990. - Vol. 34. - № 7. - P. 607-613

112. Van Lengerich B., Mauser F., Pfaller W. What is uni qui: structure, composition growth and products. Ed. By Pomeranz Y. – St. Paul Minnesota. – American Association of Cereal Chemists., 1989. – Part C, ch.23.

113. Горбатов, А.В. Гидравлика и гидравлические машины для пластично-вязких мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов, В.Д. Косой, Я.М. Виноградов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 176 с.

114. Толстогузов, В.Б. Новые формы белковой пищи / В.Б. Толстогузов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 236 с.

115. Klenk, P. Visuelle untersuchungen zum wandgleitverhaltenhochpolymerer, schmelzen / P. Klenk. - Plastverarbeiter 21, 1968. - 537 p.

116. Menning J., Kunststoffe, 71, 359-362 (1981).

117. Карташов, Л.П. Системный синтез технологических объектов АПК / Л.П. Карташов, В.Ю. Полищук. – Екатеринбург: УрОРАН, 1998. – 185 с.

118. Горбатов, А.В. Реология мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.

119. Dooley J., Robacki J., Jenkins S., Lee P., Wrisley R. Producing microlayer blown film structures using layer multiplication and unique die technology / SPE ANTEC; 2011.

120. Новиков, В.В. Математическое обоснование выходной зоны пресс-экструдера / В.В. Новиков, С.В. Денисов, Я.М. Бекетов // Актуальные инженерные проблемы АПК в XXI веке: сборник научных трудов инженерной секции Международной научно – практической конференции посвященной 85 – летию СГСХА. – Самара. – 2004. – 463 с.

121. Pittman, J.F.T., Tucker III C.L. Finite elements for field problems / edited by Carl Hanser // In Computer Modeling for Polymer Processing. Publisher, Munich. - 1989. - P. 237-331.

122. Vermeulen J. R., Gerson P.M., and Beek W.J. The Melting of a bed of polymer granules on a hot moving surface / Chem. Eng. Sci. - 1971. - Vol 26. - P. 1445-1455.

123. Огибалов, П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Нестационарные движения вязко-пластичных сред / П.М. Огибалов, А.Х. Мирзаджанзаде. – М.: Изд. МГУ, 1970. - 416 с.

124. Груздев, И.Э. Структурный анализ шнековых устройств, применяемых в пищевой промышленности / И.Э. Груздев, Н.В. Горбань, И.Б. Корнильев, В.Н. Шувалов // Интенсификация процессов и оборудования пищевых производств. - Л.: ЛТИХП. – 1976. - С. 106 - 109.

125. Геррман, Х. Шнековые машины в технологии / Х. Геррман; пер. с нем. под ред. Л.М. Фридмана. – Л.: Химия, 1975. -232 с.

126. Горюнов, А.Д. Исследование структурно-механических характеристик макаронного теста и течения его в шнековом и других каналах прессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / А.Д. Горюнов. – М., 1971. – 296 с.

127. Шрейдер М. Ю. Автоматизация процессов смешивания и прессования макаронного теста: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Марина Юрьевна Шрейдер. - Оренбург, 2008. - 118 с.

128. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

129. Полищук, В.Ю. Концепция развития прессующих механизмов непрерывного действия технологических машин сельскохозяйственного

производства: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Владимир Юрьевич Полищук. – Оренбург, 1994. – 393 с.

130. Рейнер, М. Деформация и течение / М. Рейнер. - М.: Гостоптехиздат, 1963.-318 с.

131. Виноградов, Г.В. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, Л.Я. Малкин. – М.: Химия, 1977. - 440 с.

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

133. Мидлман, С. Течение полимеров / С. Мидлман. – М.: Мир, 1971. - 259 с.

134. Коротков, В.Г. Оптимизация процесса измельчения в дробилках ударного принципа действия / В.Г. Коротков, С.В. Антимонов, Н.В. Зайцева // Российская научно-техническая конференция «Совершенствование технологических процессов пищевой промышленности и АПК», ОГУ, Оренбург. – 1996. – С.115 – 116.

135. Молодцов, С.А. Комбикормовая промышленность за рубежом / С.А. Молодцов, В.Б. Зорин // ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР, Комбикормовая промышленность, экспресс-информация. – Вып.1 – 15 с.

136. Москалева, Н.А. Комбикормовая промышленность за рубежом / Н.А. Москалева // ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР. Хранение и переработка зерна, экспресс-информация. – 1988. – Вып. 8. – 18 с.

137. Глебов, Л.А. Интенсификация процессов измельчения сырья при производстве кормов: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.18.12 / Глебов Леонид Александрович. – М., 1990. – 540 с.

138. Глебов, Л.А. Основные направления в совершенствовании процесса измельчения компонентов комбикормов / Л.А. Глебов, А.Я.Соколов, А.А. Хитов. – М., 1987. – С. 145. – Деп. в ВИНТИ 20.04.87, № 7.

139. Соколов, А.Я. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств / А.Я. Соколов. – М.: Машиностроение, 1969. – 637 с.

140. Исследование прочности деталей машин при помощи тензодатчиков сопротивления / Под редакцией Г.С. Писаренко. – Киев: Техника, 1967.
141. Tadmor, Z. Engineering principles of plasticating extrusion / Z. Tadmor, I. Klein. - Van Nostrand Reinhold, NY, 1970. - 503 p.
142. Shapiro, J. Nonorientable dual loop graphs and isospin / J. Shapiro // Phys. Rev. - 1971. - № 4.- P. 1249-1251.
143. Vermeulen J. R., Scargo P.G., and Beek W.J. The melting of a crystalline polymer in a screw extruder / Chem. Eng. Sci. - 1971. - Vol. 26. - P. 1457-1465.
144. Viriyayuthakorn M., Kassahun B. A three dimensional model for plasticating extrusion screw design / SPE ANTEC, New Orleans. - 1984. - Vol. 30. - P. 81-84.
145. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. - М.: Мир, 1964. - 216 с.
146. Tadmor, Z. Method and apparatus for processing polymeric materials. Patent U.S., № 4.194.841, 1980.
147. Rauwendaal, C. Melting theory for temperature-development fluids, exact analytical solution for powder law fluids / Adv. Polym. Techn. - 1992. - № 11. - P. 19-25.
148. Cox A.P.D., Fenner R.T. Melting performance in the single screw extrusion of thermoplastics / Polymer engineering and science. - 1980. - № 20. - P. 562-571. - ISSN: 0032-3888
149. Edmondson I.R., Fenner R.T. Melting of thermoplastics in single screw extruders / Polymer. - 1975. - № 16. - P. 49-56. - ISSN: 0032-3861.
150. Edmondson, I. R., Ph.D. Thesis, University of London (1972).
151. Fenner, R.T. Developments in the analysis of steady screw extrusion of polymers / Polymer. - 1977. - № 18. - P. 617-635.
152. Meijer, H.E.H. Multi-scale analysis of mechanical properties of amorphous polymer systems / H.E.H. Meijer // Materials Technology, Dutch Polymer Institute, The Netherlands. - 2003. - № 204. - P. 274-288.

153. Donovan, R.C. Pressure profiles in plasticating extruders / Polym. Eng. Sci. - 1971. - № 11. P. 247-257.

154. Halmos, A.L. Melting in single screw extruders. Part 3: Solutions for a power law temperature-dependent viscous melt / A.L. Halmos, J.R.A. Pearson, R. Trottnow // Polymer. - 1978. - № 19. - P. 1199-1216.

155. Pearson, J.R.A. On the melting of solids near a hot moving interface, with particular reference to beds of granular polymers / Int. J. Heat Mass Transfer. - 1976. - № 19. - P. 405-511.

156. Shapiro, J. Melting in single screw extruders / J. Shapiro, A.L. Halmos, J.R.A. Pearson // Polymer. - 1976. - № 17. - P. 905-918.

157. Hinrichs, D.R. A modified melting model for plastifying extruders / D.R. Hinrichs, L.U. Lilleleht // Polym. Eng. Sci. - 1970. - № 5 - P. 268 - 278.

158. Sundstrom, D.W., Young C.C. Rate of melting of crystalline polymers under shear conditions and / Polym. Eng. Sci. - 1972. - № 12. - P. 59-63.

159. Sundstrom, D.W. Softening rates of polystyrene under shear conditions / D.W. Sundstrom, J.R. Lo // Polym. Eng. Sci. - 1978. - № 18. - P. 422-426.

160. Chung, C.I. A new theory for single-screw extrusion / Modern. Plast. - 1968. - №.9. - P. 178-198.

161. Chung, C. I. New ideas about solids conveying in screw extruders / Soc. Plast. Eng. J. - 1970. - № 26(5). - P. 32-44.

162. Cox A.P.D., Williams J.G., Isherwood D.P. The melting behavior of a low-density polyethylene powder in a screw extruder / Polymer engineering and science. - 1981. - № 21. - P. 86-92. - ISSN: 0032-3888.

163. Tadmor, Z., Duvdevani I., Klein I. Melting in plasticating extruders—theory and experiments / Polym. Eng. Sci. - 1967. - № 7. - P. 198-217.

164. Mount III, E.M. A scientific approach to screw design / E.M. Mount III, J.G. Watson, C.I. Chung // Polym. Eng. Sci. - 1982. - № 22. - P. 729-737.

165. Лазинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А.А. Лазинский, А.П. Толчинский. – Л.: Машиностроение, 1970. - 752 с.

166. Ионов, В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В.Н. Ионов, В.В. Селиванов. – М.: Мир, 1976. - т. 3. - с. 17 - 66.
167. Перов, А.А. Совершенствование рабочих органов машин для измельчения компонентов минерально-концентратных добавок в кормоцехах колхозов и совхозов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Петров. – М., 1985. – 19 с.
168. Плохов, Ф.Г. Исследование динамики рабочего процесса молотковой дробилки замкнутого типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Ф.Г. Плохов. – М., - 1966. – 201с.
169. Плановский, А.Н. Поле скоростей и давлений в гладкостенных аппаратах с радиально – лопастными мешалками. –В кн.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. - М., НИИТЭхим, 1971, с. 3 – 21.
170. Сыроватка, В. Оборудование и технические средства для приготовления комбикормов / В. Сыроватка, С. Рыжов // Комбикормовая промышленность. – 1997. – № 5 – С. 12 – 13.
171. Демский, А.Б. Справочник по оборудованию зерноперерабатывающих предприятий / А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – 383 с.
172. Бостанджиян, С.А. Течение неньютоновской жидкости между двумя параллельными плоскостями / С.А. Бостанджиян, А.М. Столин // Известия АН СССР, Механика. – 1965. – № 1. - С. 185-188.
173. Зубкова, Т.М. Исследование и оптимальное проектирование одношнековых прессующих механизмов экструдеров: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Зубкова Татьяна Михайловна. – Оуяярбург: ОГУ, 1997. – 22 с.
174. Праднтль, Л. Гидромеханика / Л. Праднтль; пер. с нем. – М.: Изд – во Иностран. лит. 1949.
175. Правила организации и ведения технологического процесса производства продукции комбикормовой промышленности. Воронеж, 1991.–342с.
176. Новиков, В.В. К вопросу обоснования длины шнека пресс-экструдера / В.В. Новиков С.В. Денисов // Сборник трудов научно-практического совещания –

семинара. Проблемы использования техники в животноводстве. Выпуск 4 Том 1. ГНУВИИТиН. – Тамбов. – 2003 г. – 33 с.

177. Бегачев, В.И. О взаимодействии окружной скорости и мощности при перемешивании / В.И. Бегачев // ТОХТ. – 1972. - № 2. – С. 260–280.

178. Полищук, В.Ю. Экспериментальное исследование напряжений в пластическом материале при его прессовании в цилиндрическом канале фильеры / В.Ю. Полищук // Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ. – С. 29 – 35.

179. Остриков, А.Н. Разработка экструдеров с регулируемой величиной давления / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.С. Рудометкин, К.В. Платов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, - 2003. – № Специальный выпуск журнала, «Математическое моделирование и компьютерные технологии» - С. 50-54.

180. Соколов, А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. – М.: Колос, 1984. – 445 с.

181. Раувендааль, К. Экструзия полимеров / К. Раувендааль; пер. с англ. А. Я. Малкина.- 4-е изд. - СПб.: Профессия, 2008. - 768 с. - ISBN 978-5-93913-102-5.

182. Tadmor, Z., Broyer E. Solids conveying in screw extruders. Part II. Non Isothermal model / Polym. Eng. Sci. - 1972. - № 12. - P. 378-386.

183. Мак-Келвин, Д.М. Переработка полимеров / Д.М. Мак-Келвин; пер. с англ. – М.: Химия, 1965. – 442 с.

184. Тимофеева, Д.В. и др. Экструдер шнековый / Д.В. Тимофеева, В.П. Попов, В.П. Ханин, С.В. Кишкилев, С.В. Антимонов, А.Г. Зинюхина // Пат. 2548980 МПК В 29 С 47/38, А 23 Р 1/12. - № 2013148712/05; Заяв. 31.10.2013; Оpubл. 20.04.2015. – Бюл. № 11.

185. Тимофеева, Д.В. Разработка энерго- и ресурсосберегающей линии для производства кормов и кормовых добавок с применением криогенных воздействий и пресс-экструдера с измененной конструкцией рабочего органа / Д.В. Тимофеева, С.В. Кишкилев, С.В. Антимонов, Н.Н. Мартынов // Инновации в науке: сборник статей по материалам XLIII международной научно-практической конференции № 3 (40). Новосибирск; Изд. «СибАК», 2015. – С. 80-87.

186. Немец, И. Практическое применение тензорезисторов / И. Немец; пер. с чешск. - М.: Энергия, 1970. – 144 с.

187. Goldacker, E. By supplying the powder to the theory of the pressure in the extruder / E. Goldacker, R. Rautenbach // Chemie Ind. Techn. - 1972. - № 44. P. 405-410.

188. Rautenbach, R., Goldacker E. Zur optimalen gestaltung der einzugszone von einschneckenextrudern / Kunststoffe, Muenchen. - 1971. - № 61. - P. 104-107.

189. Мартынова, Д.В. Исследование зависимости динамического коэффициента трения от исходных факторов при экструдировании зернового сырья / Д.В. Мартынова, Н.Н. Мартынов, В.П. Попов // Молодежь как импульс в техническом прогрессе: материалы IV международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников. – Самара – Оренбург: СамГУПС, 2016. – 208-211.

190. СТО АИСТ 19.5–2012. Машины и оборудование для брикетирования, гранулирования и экструдирования кормов. Методы оценки функциональных показателей. - Взамен СТО АИСТ 19.5–2008; введ. 2013-03-15. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Кировская государственная зональная машиноиспытательная станция»; М.: ФГБУ «Кировская МИС», 2013. – 36.

191. Тимофеева, Д.В. Исследование процесса преобразования сыпучего материала в упруго-вязко-пластичный в канале шнека пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов // Материалы IX международной научно-практической конференции «Бъдещие изследования»,- 2013. Том 25. Селско стопанство. Ветеринарна наука. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД – 50-54 стр.

192. Тимофеева, Д.В. Модернизация рабочего органа типового одношнекового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.Г. Коротков, В.П. Попов, С.В. Антимонов // Хлебопродукты. – 2014. - № 10. – С. 50-52.

193. Мартынова, Д.В. Разработка и оптимизация конструктивных элементов экструдера на основе изучения химических преобразований биополимеров с

целью снижения энергопотребления и повышения качества продукта / Д.В. Мартынова, Н.Н. Мартынов, В.П. Попов, Е.И. Панов // «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2016. – С. 1145-1153. – ISBN 978-5-7410-1385-4.

194. Тимофеева, Д.В. Исследование преобразования структурно-механических свойств и химического состава белково-крахмало-клетчаткосодержащего сырья в канале одношнекового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, С.В. Кишкилев, В.П. Попов, Н.Н. Мартынов // «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием); Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. – С. 1007-1014. ISBN 978-5-7410-1385-4.

195. Тимофеева, Д.В. Исследование изменения аминокислотного состава зернового сырья в процессе экструзионной обработки / Д.В. Тимофеева, Н.Н. Мартынов, В.П. Попов // Молодежь как импульс в техническом прогрессе: материалы III международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников. – Самара – Оренбург: СамГУПС, 2015. – 280-283.

196. Тимофеева, Д.В. Анализ изменения химического состава зерновой смеси в процессе экструзионной обработки / Д.В. Тимофеева, С.В. Кишкилев, И.А. Бочкарева, Н.Н. Мартынов // Образование, наука, транспорт в XXI веке: опыт, перспективы, инновации: материалы V международной научно-практической конференции. – Самара – Оренбург: СамГУПС, 2015. – 83-88.

197. Мартынова, Д.В. Оптимизация процесса экструдирования белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья / Д.В. Мартынова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. - № 3. – С. 151-156.

198. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств: учеб. пособие для вузов / под ред. А. Я. Соколова.- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1969. – 640 с.

199. Рядчиков, В. Г. Пищевое поведение животных при разных формах баланса незаменимых аминокислот / В. Г. Рядчиков, И. В. Тарабрин, Н. П. Радуль, Р. Х. Зиганшин // Сельскохозяйственная биология, 2005. – № 5, С. 3–13.

200. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Справочное пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. А. П. Калашникова, В. И. Фисинина, В. В. Щеглова, Н. И. Клейменова. – М., 2003.

201. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Методология, ошибки, перспективы / В. Г. Рядчиков // Сельскохозяйственная биология: Сер. биология животных. - 2006. - №4. - С. 68-81

202. Мартынова, Д.В. Определение экономических параметров процесса экструдирования биополимеров / Д.В. Мартынова, Н.Н. Мартынов, И.А. Бочкарева, Е.И. Панов // «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2016. – С. 1138-1145. – ISBN 978-5-7410-1385-4.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Шкала перевода значений показателей качества экструдированного  
кормового продукта в баллы качества**

Наименование показателя качества	Значение показателя в натуральном выражении	Присваиваемый балл качества, Бк	Коэффициент значимости показателя, Кзн	Произведе- ние Бк · Кзн
Влажность, %	Ниже 12,1	1	2	1
	12,1 – 12,3	2		4
	12,4 – 12,6	3		6
	12,7 – 12,9	4		8
	13	5		10
	13,1 - 15	4		8
	15,1 – 20	3		6
	20,1 – 28	2		4
Свыше 28,0	1	2		
Крошимость, %	Ниже 4,1	5	7	35
	4,1-8,0	4		28
	8,1-12,0	3		21
	12,1-16,0	2		14
	Свыше 16,0	1		7
Удельная прочность, г/мм <sup>2</sup>	Свыше 25,0	5	7	35
	25,0-21,6	4		28
	21,5-18,1	3		21
	18,0-14,6	2		14
	Ниже 14,5	1		7

**Обработка результатов экспертной оценки кормового продукта полученного  
в ходе трехфакторного эксперимента ПФЭ 2<sup>3</sup>**

**Результаты ранжирования внешнего вида кормового продукта  
(коэффициент значимости K=3)**

№ образца	Эксперт					Сумма рангов, Ср	Ср · К
	1-ый	2-ой	3-й	4-ый	5-ый		
1	10	9	8	8	7	42	126
2	8	10	10	9	11	48	144
2	9	7	9	10	9	44	132
4	12	11	13	14	12	62	186
5	14	15	11	12	15	67	201
6	11	14	12	15	14	66	198
7	15	13	14	13	13	68	204
8	13	12	15	11	10	61	183
9	7	8	6	7	6	34	102
10	5	6	7	5	8	31	93
11	6	5	4	6	5	26	78
12	2	4	5	2	4	17	51
13	4	1	3	4	3	15	45
14	3	2	1	1	2	9	27
15	1	3	2	3	1	10	30

**Результаты ранжирования аромата кормового продукта (коэффициент  
значимости  $K=5$ )**

№ образца	Эксперт					Сумма рангов, Ср	Ср · К
	1-ый	2-ой	3-й	4-ый	5-ый		
1	15	13	11	14	15	68	340
2	5	6	7	6	5	29	145
3	14	14	15	13	13	69	345
4	1	3	2	3	1	10	50
5	13	15	12	15	14	69	345
6	2	2	4	1	3	12	60
7	12	10	13	11	11	57	285
8	11	12	10	12	12	57	285
9	10	11	14	10	10	55	275
10	9	8	9	8	7	41	205
11	8	7	6	7	8	36	180
12	7	9	8	9	9	42	210
13	6	4	5	5	6	26	130
14	4	5	3	4	4	20	100
15	3	1	1	2	2	9	45

**Обработка результатов экспертной оценки кормового продукта, полученного  
в ходе трехфакторного эксперимента ПФЭ 2<sup>3</sup> (продолжение)**

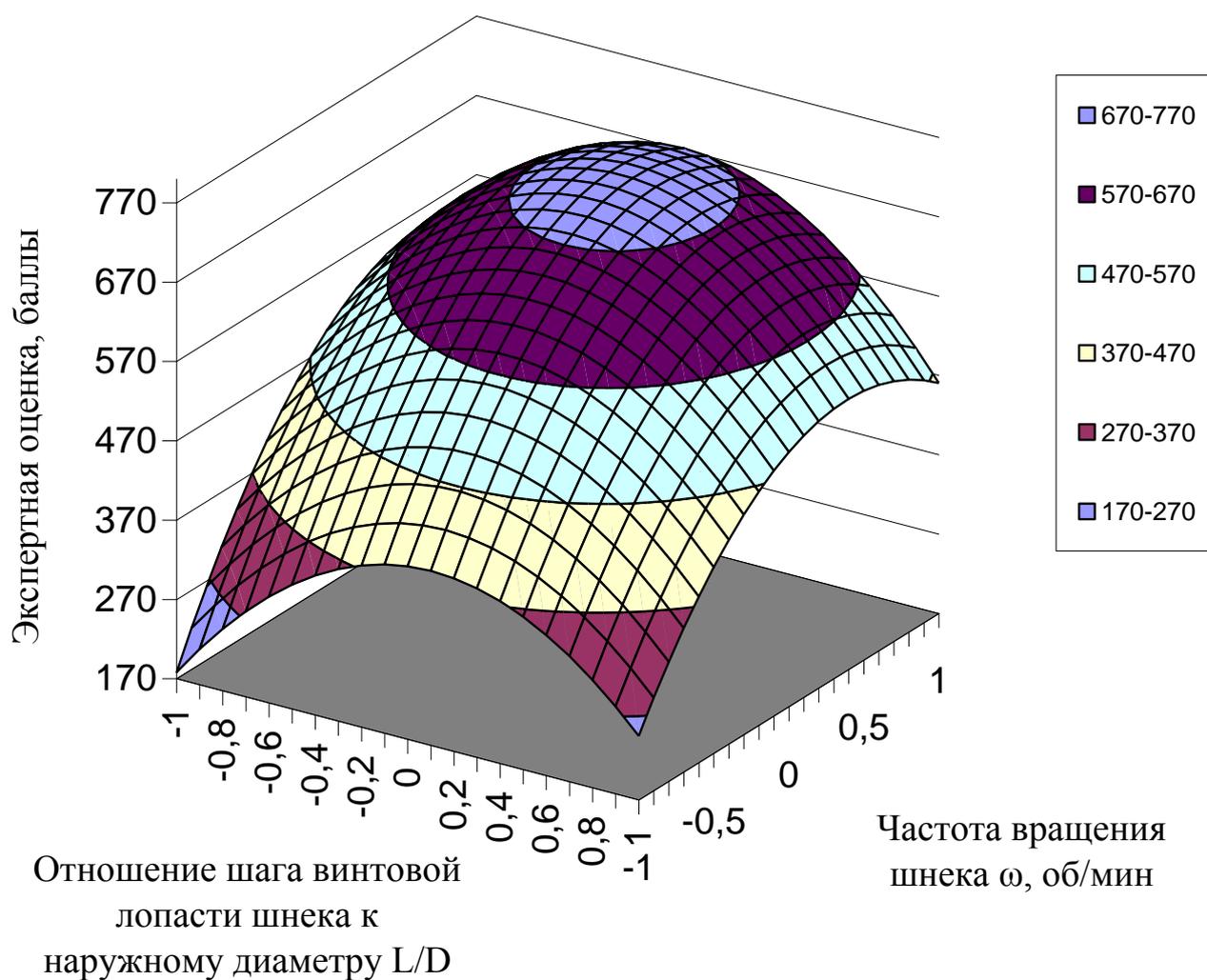
**Результаты ранжирования цвета кормового продукта (коэффициент  
значимости для вкуса K=3)**

№ образца	Эксперт					Сумма рангов, Ср	Ср · К
	1-ый	2-ой	3-й	4-ый	5-ый		
1	7	1	5	4	5	22	66
2	13	11	9	9	10	52	156
2	11	15	14	14	15	69	207
4	1	2	1	1	2	7	21
5	14	12	15	15	14	70	210
6	12	10	10	11	11	54	162
7	3	4	3	3	1	14	42
8	9	9	11	10	9	48	144
9	15	14	13	12	12	66	198
10	10	13	12	13	13	61	183
11	6	8	7	8	8	37	111
12	8	6	8	6	7	35	105
13	5	7	6	7	6	31	93
14	2	3	2	2	3	12	36
15	4	5	4	5	4	22	66

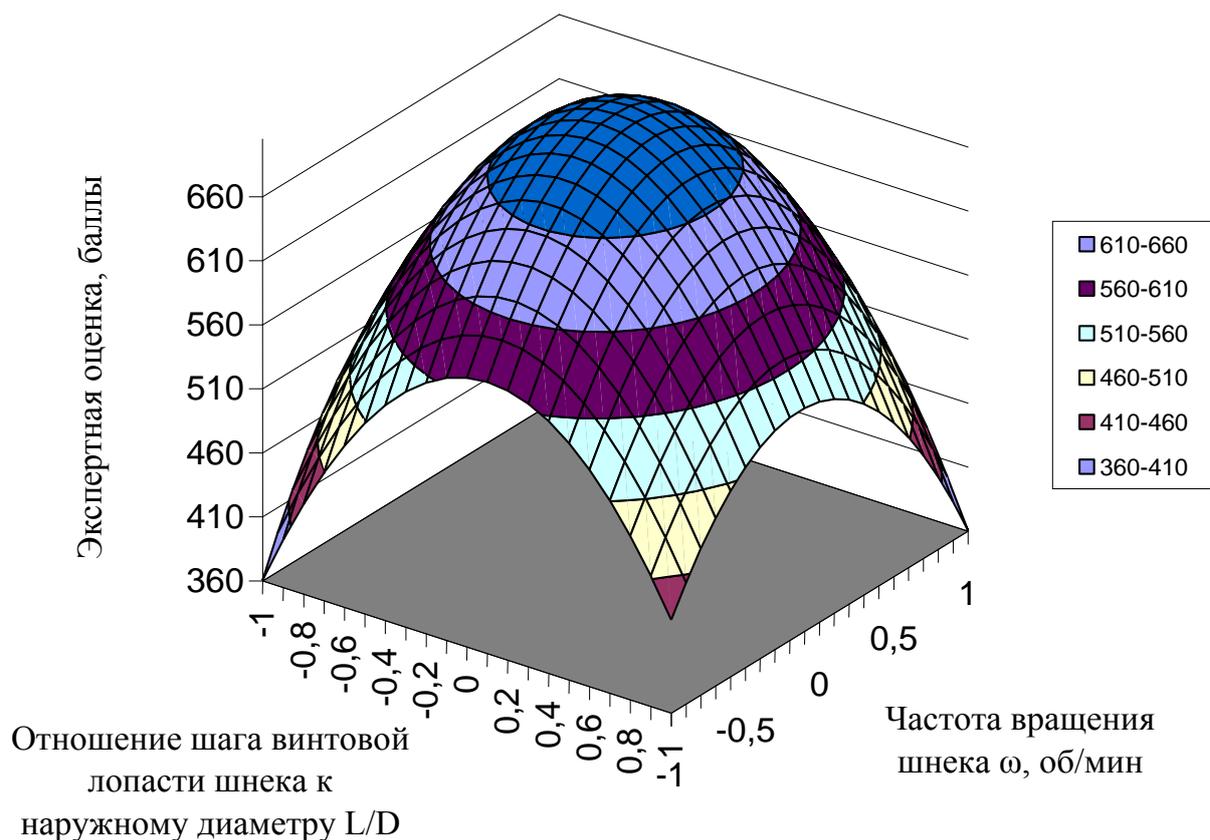
**Сумма результатов ранжирования внешнего вида, аромата и цвета  
кормовых продуктов (коэффициенты значимости К=3, К=5, К=3)**

№ образца	Внешний вид	Запах	Вкус	Итого
	Ср · К	Ср · К	Ср · К	Сумма Ср · К
1	126	340	66	532
2	144	145	156	445
2	132	345	207	684
4	186	50	21	257
5	201	345	210	756
6	198	60	162	420
7	204	285	42	531
8	183	285	144	612
9	102	275	198	575
10	93	205	183	481
11	78	180	111	369
12	51	210	105	366
13	45	130	93	268
14	27	100	36	163
15	30	45	66	141

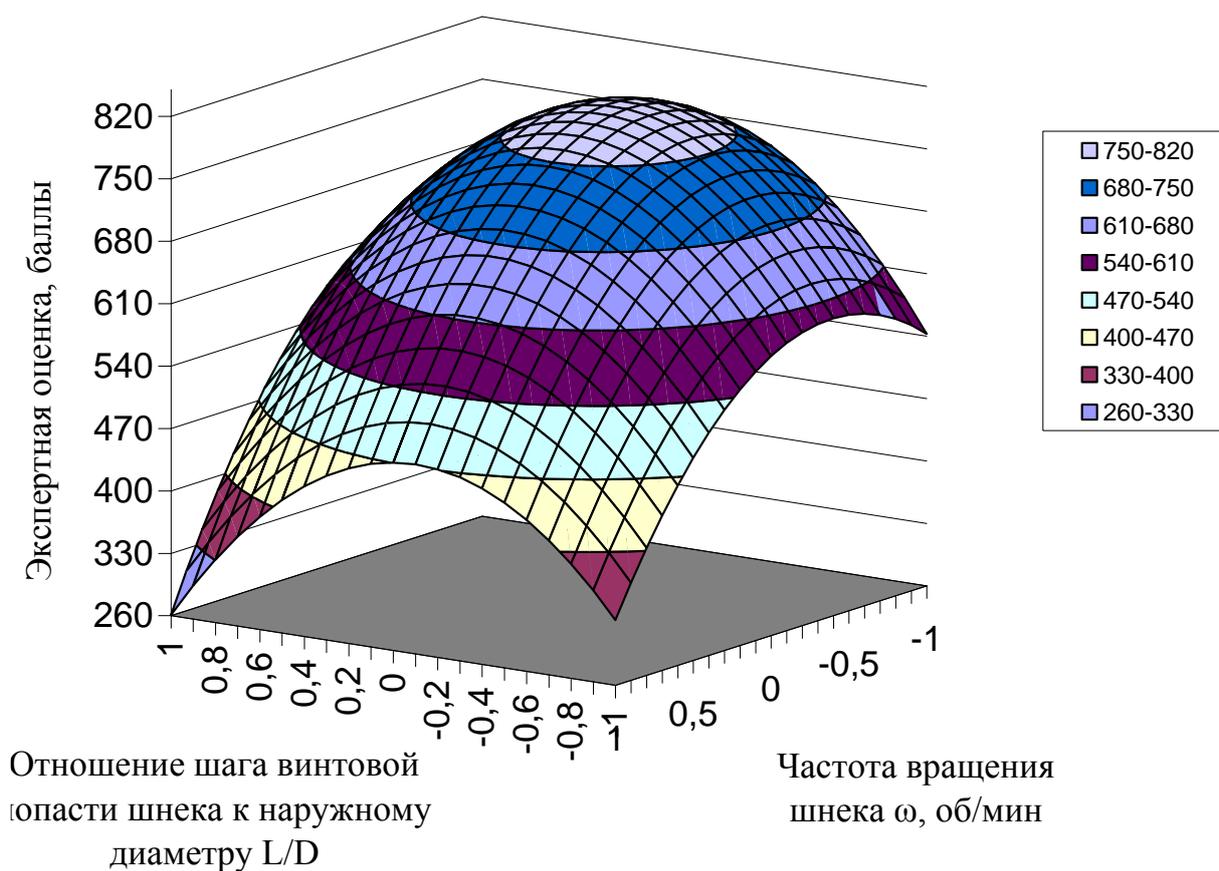
Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



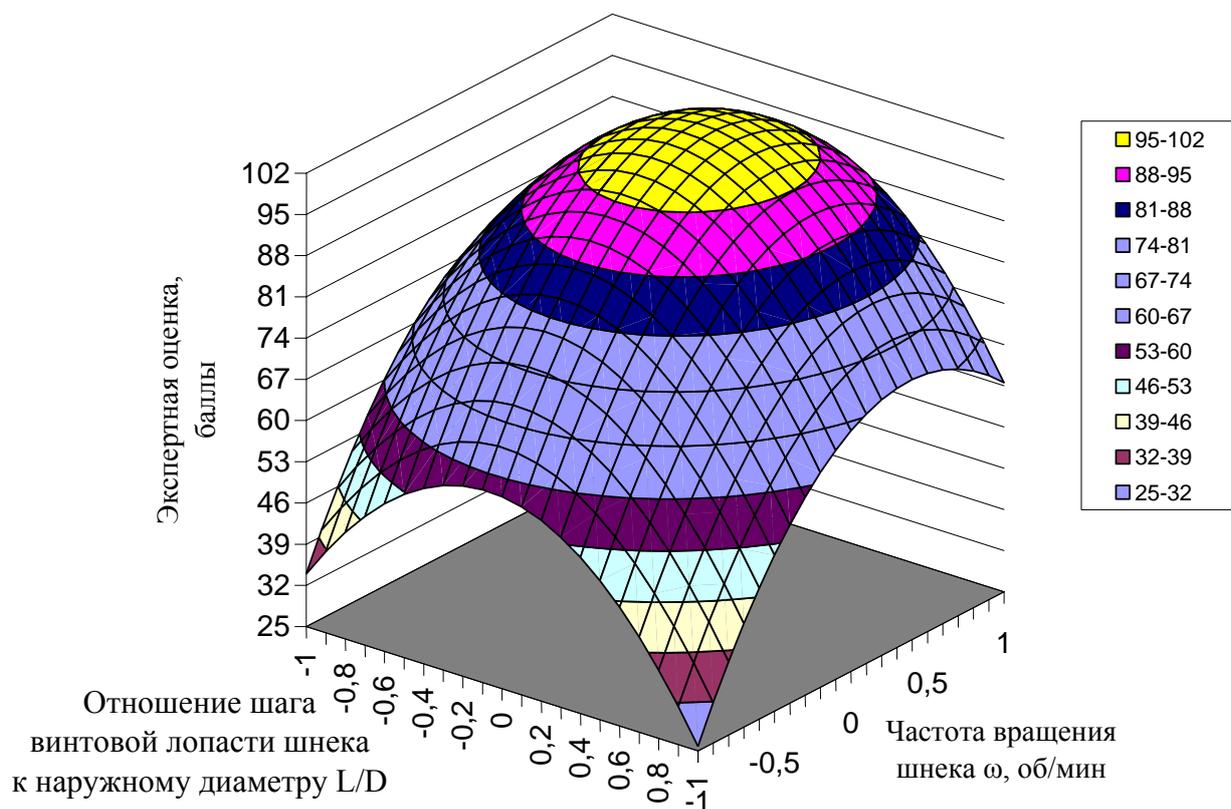
Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40^{\circ}\text{C}$ )



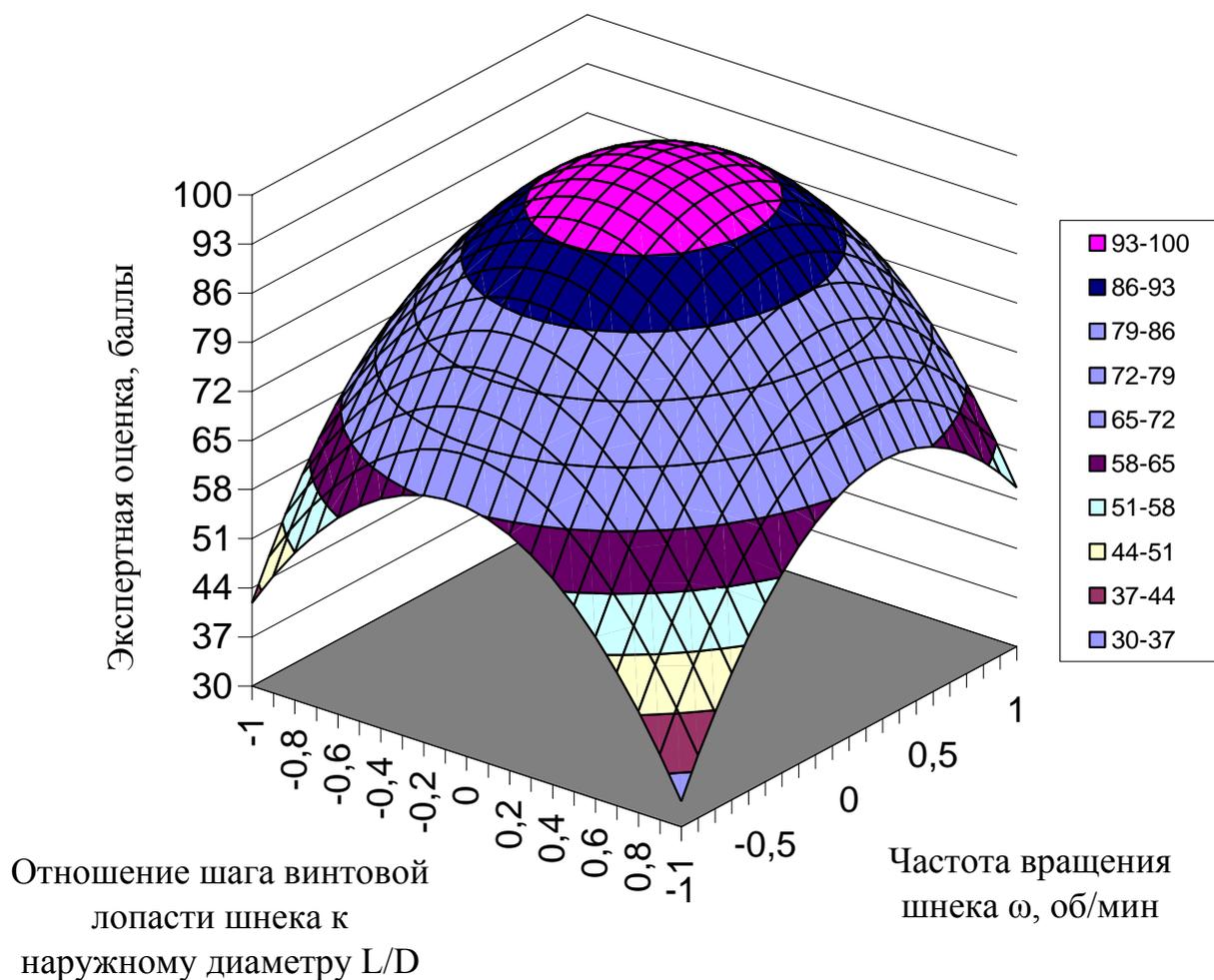
Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



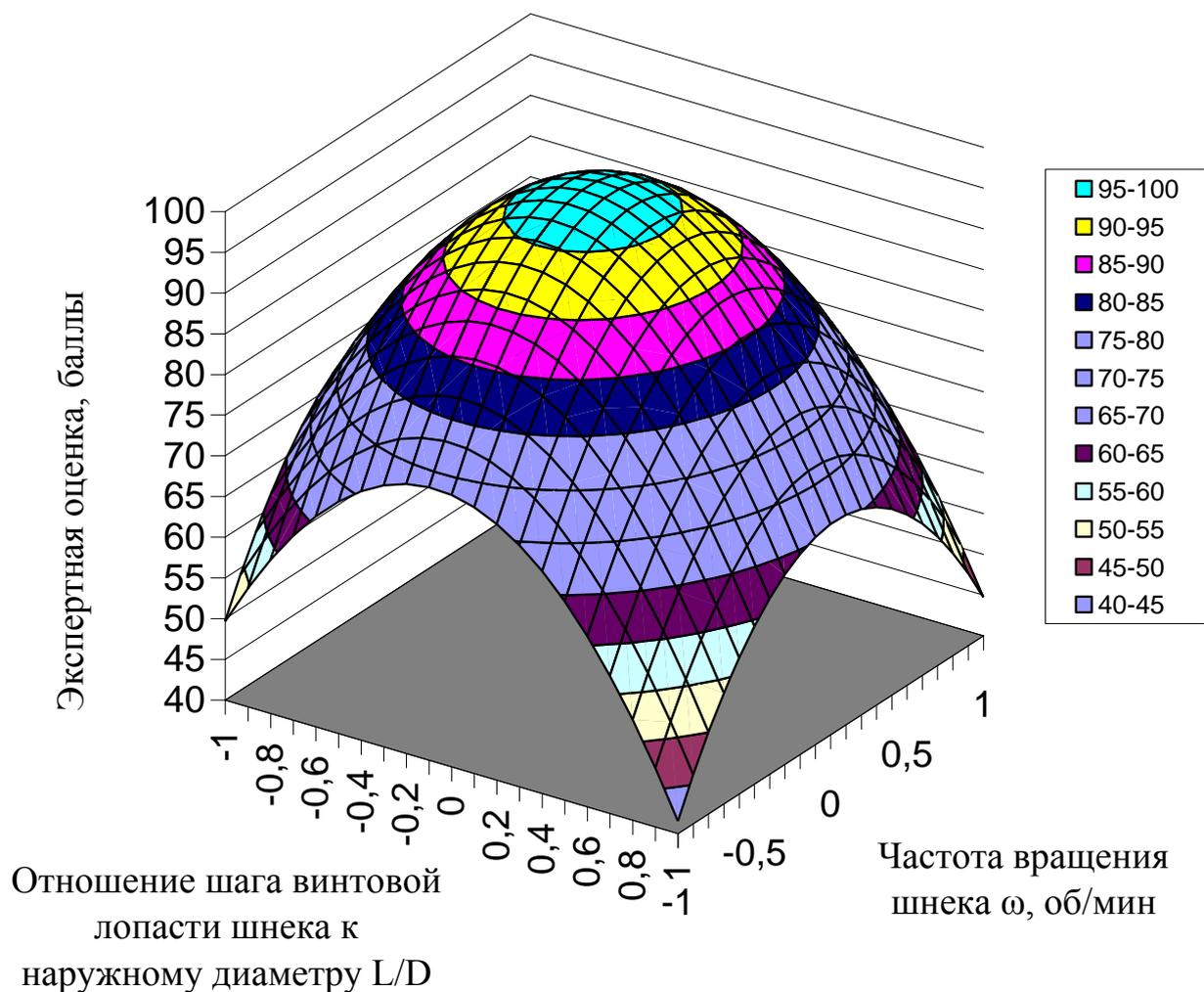
Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20^{\circ}\text{C}$ )



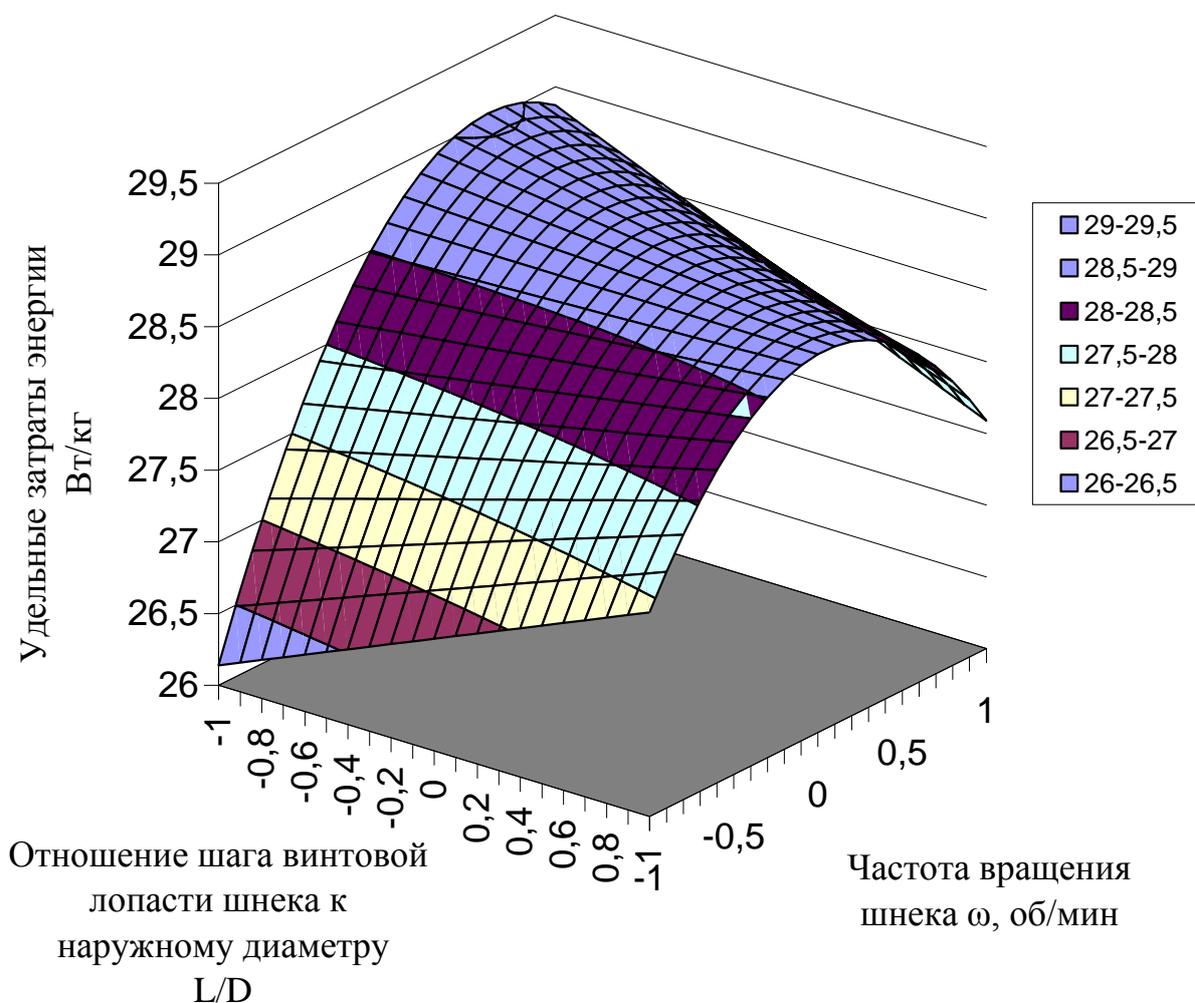
Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40^{\circ}\text{C}$ )



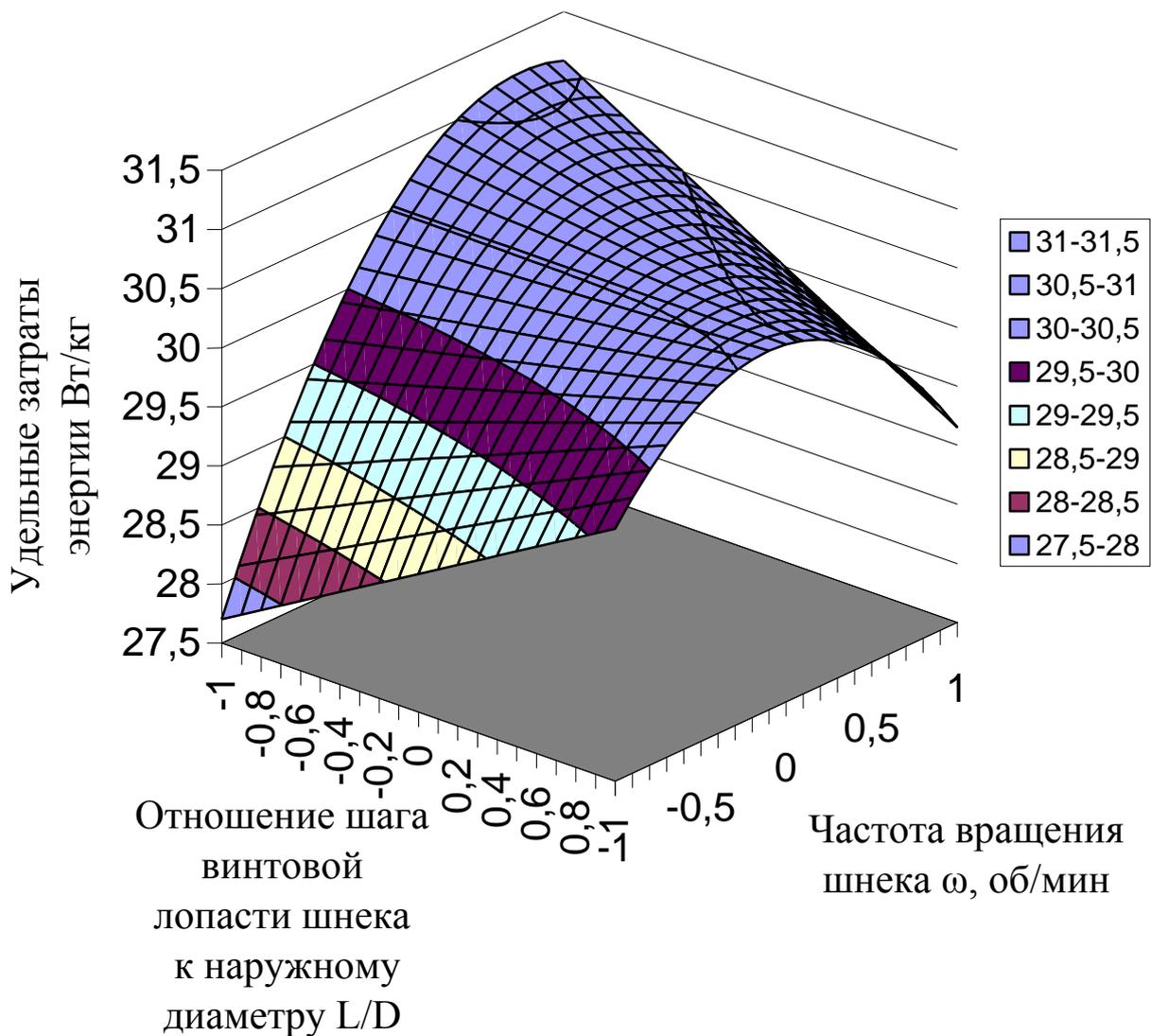
Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60^{\circ}\text{C}$ )



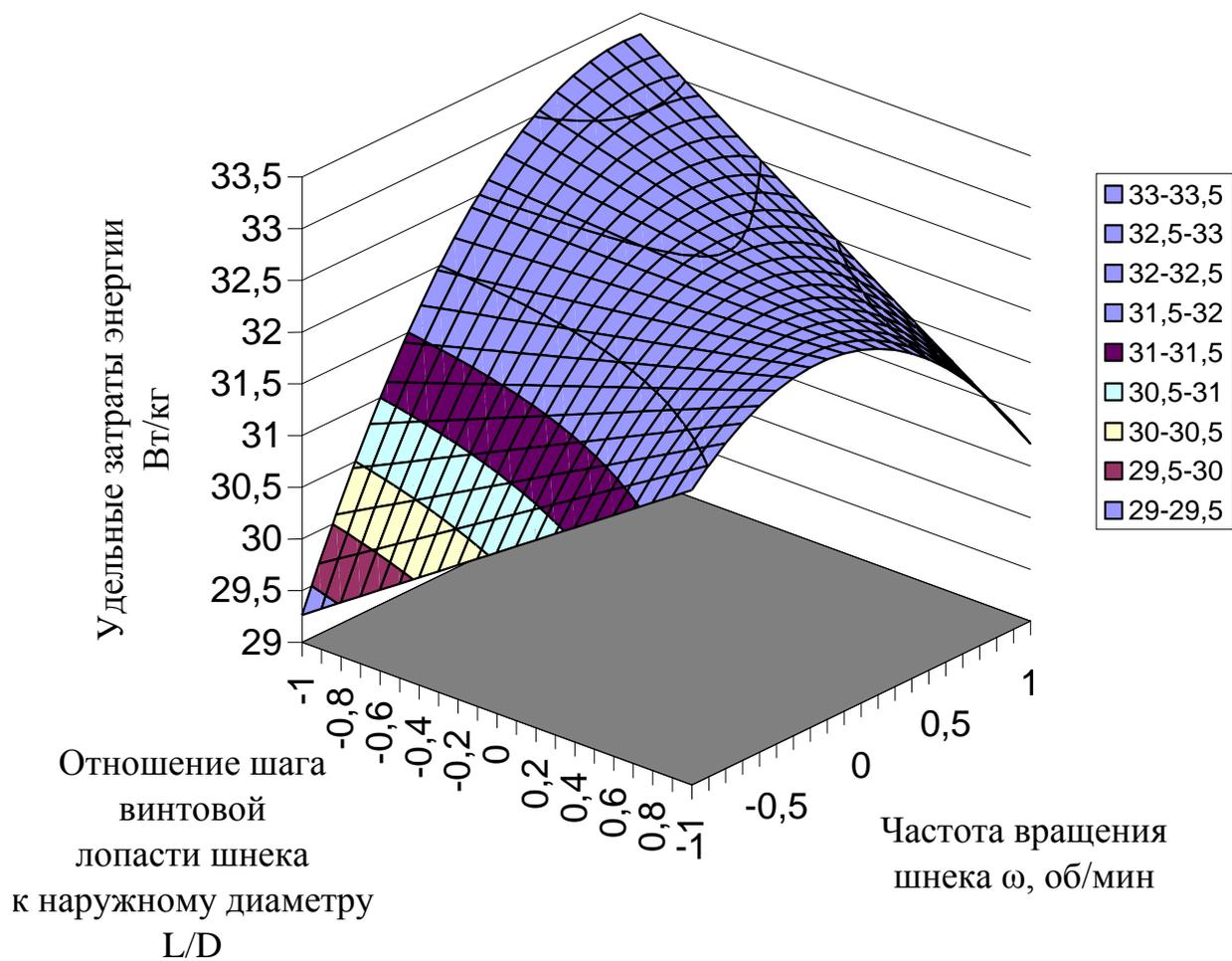
Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20^{\circ}\text{C}$ )



Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

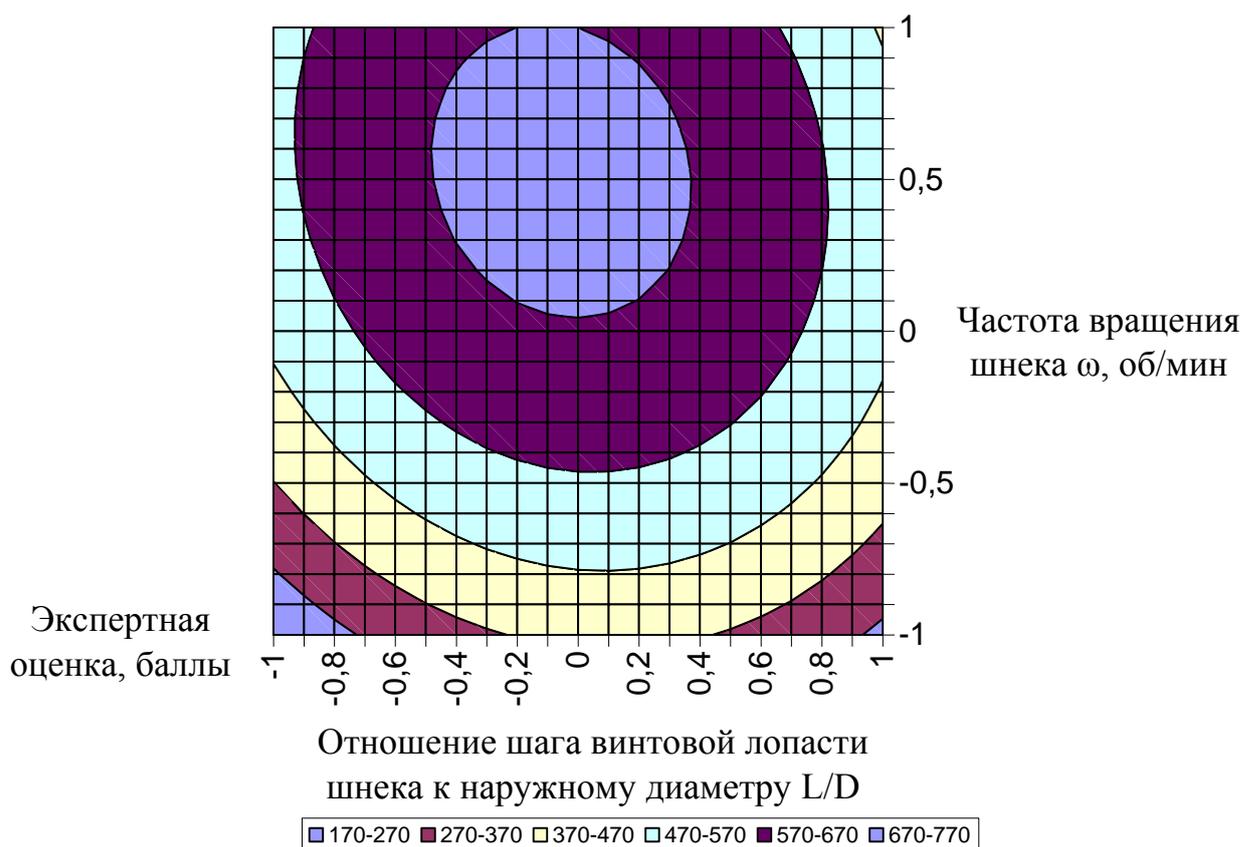


Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60^{\circ}\text{C}$ )

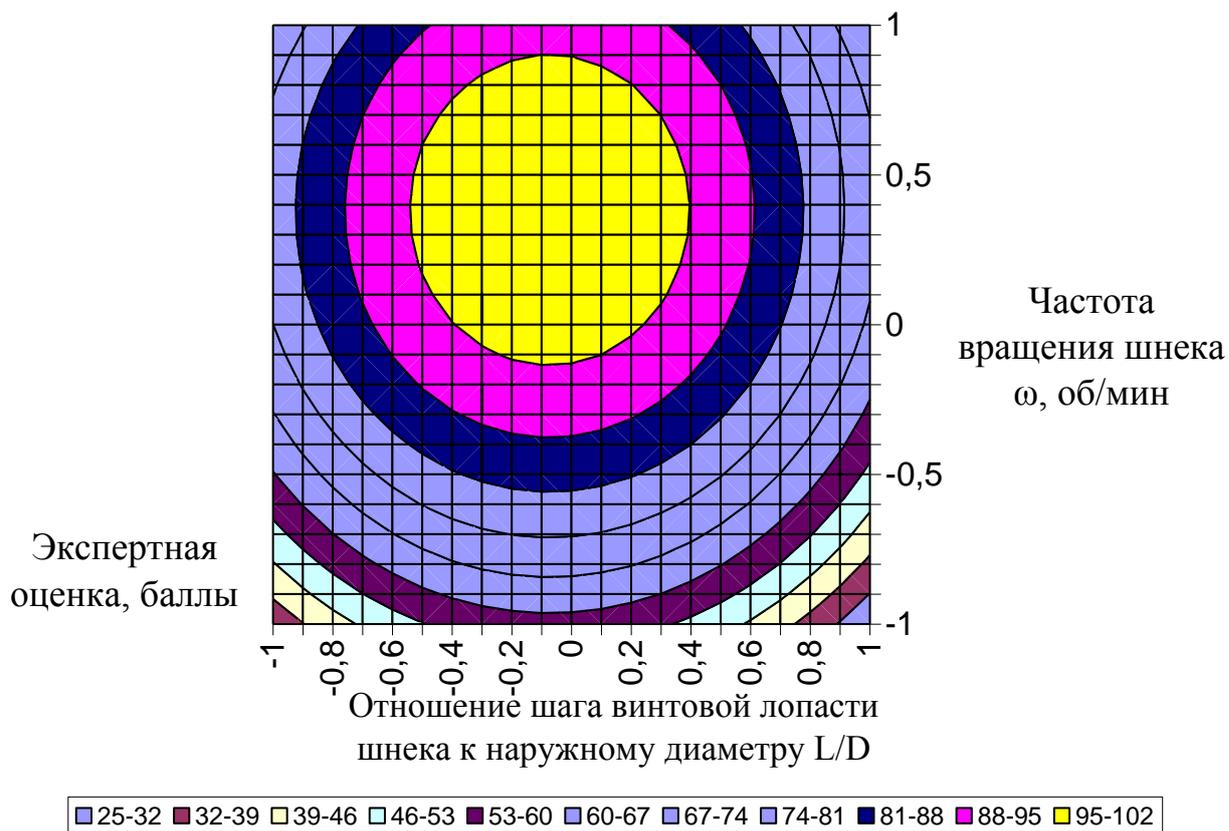


Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека

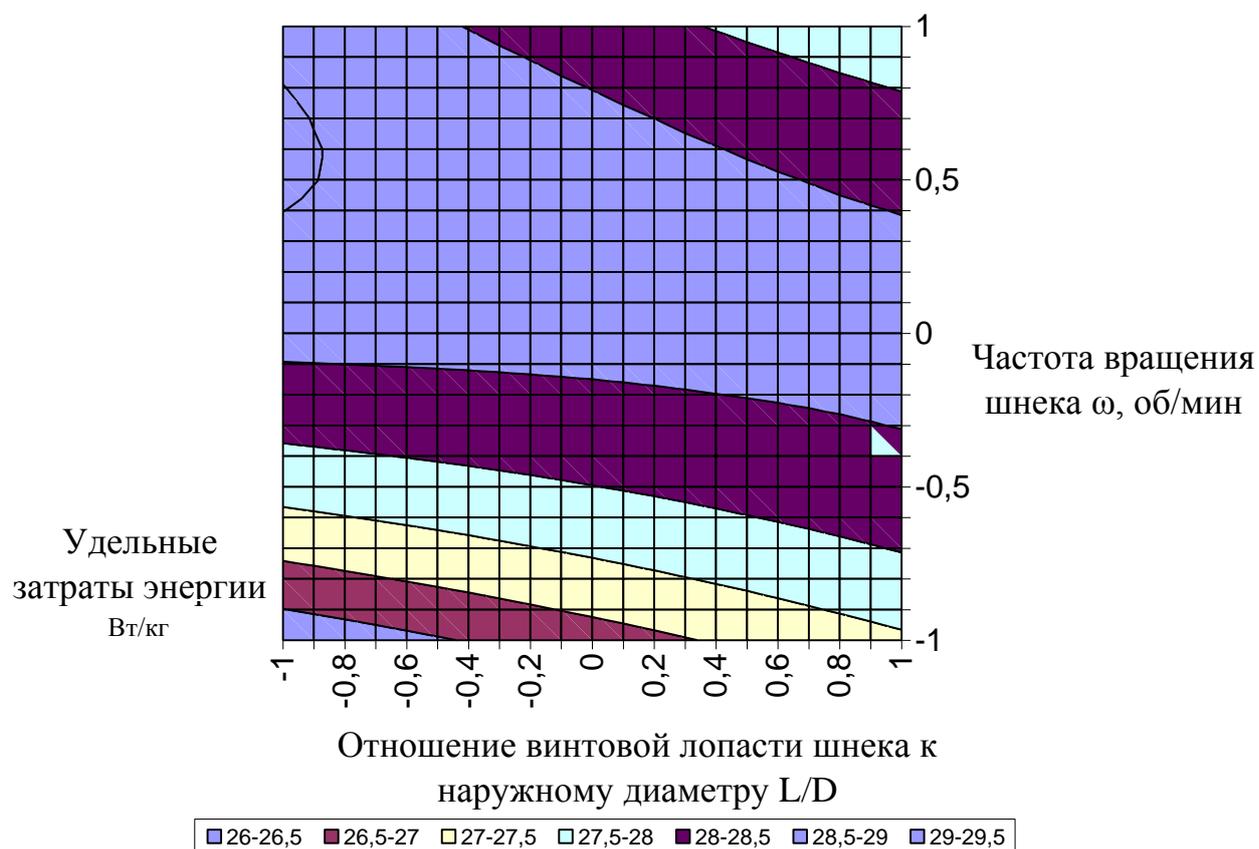
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



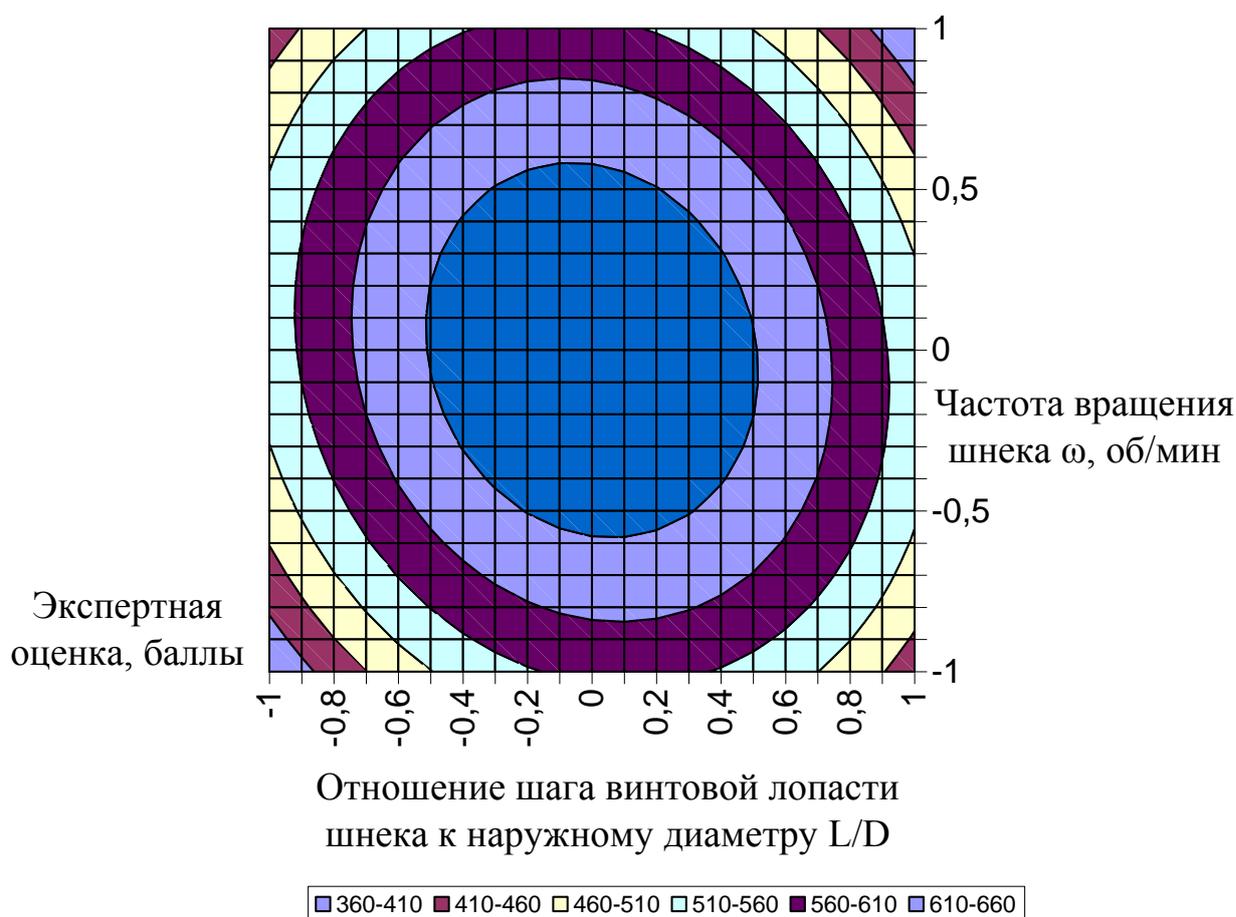
Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



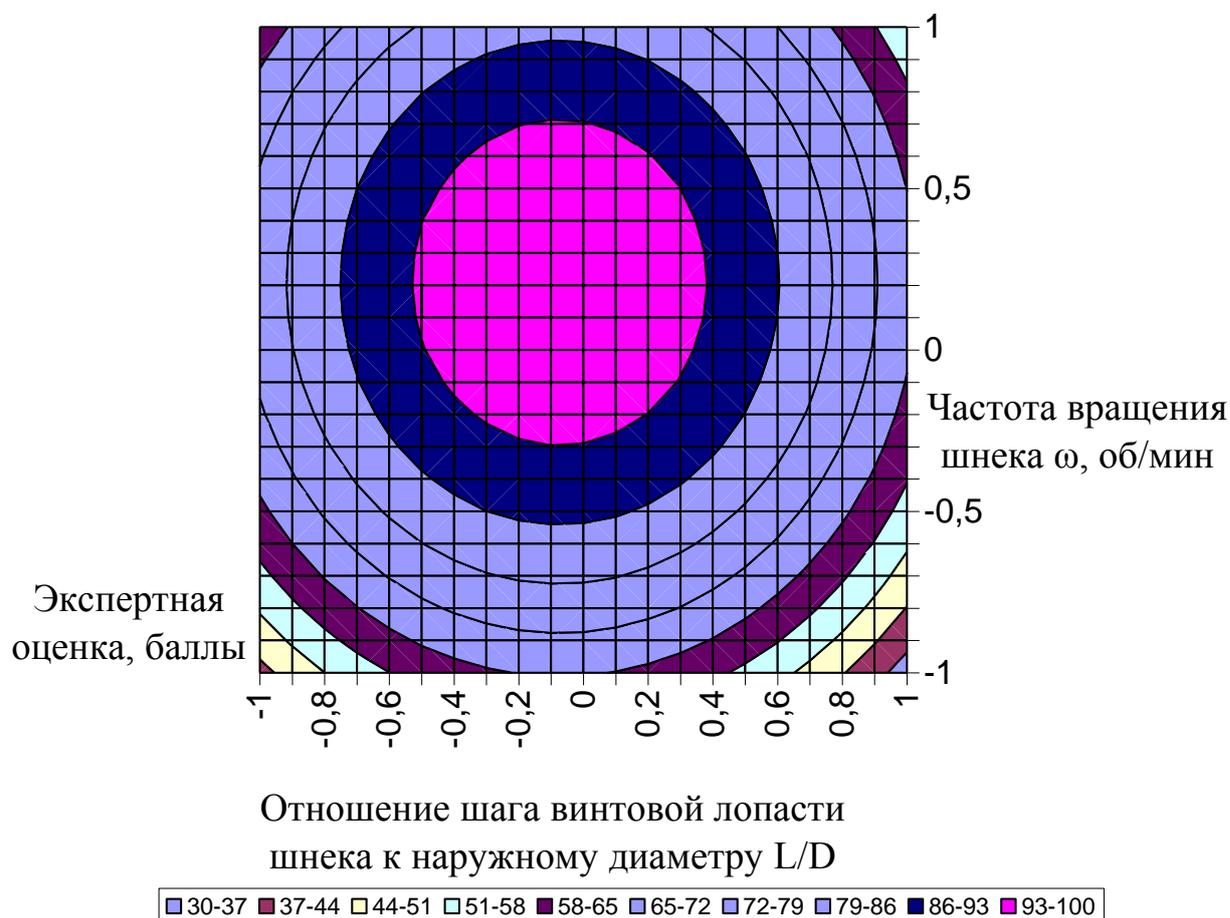
Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



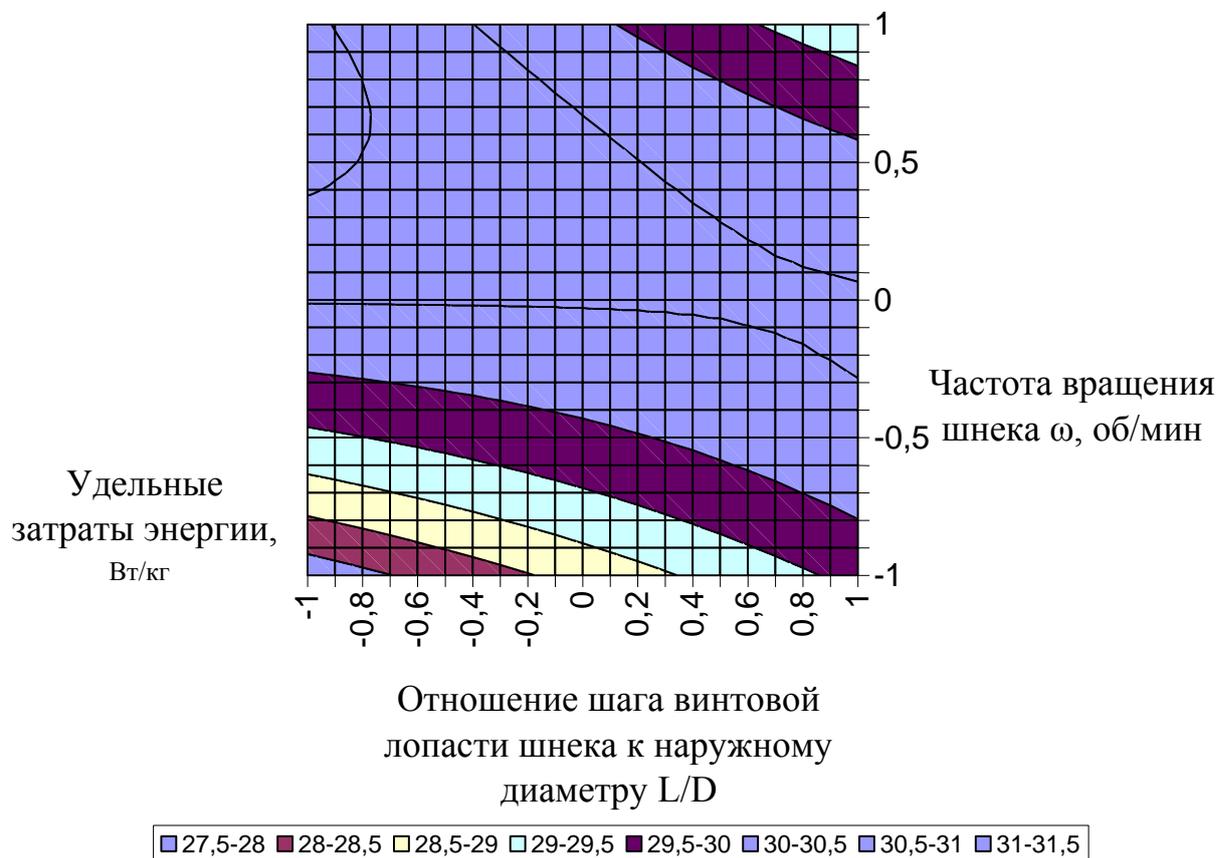
Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



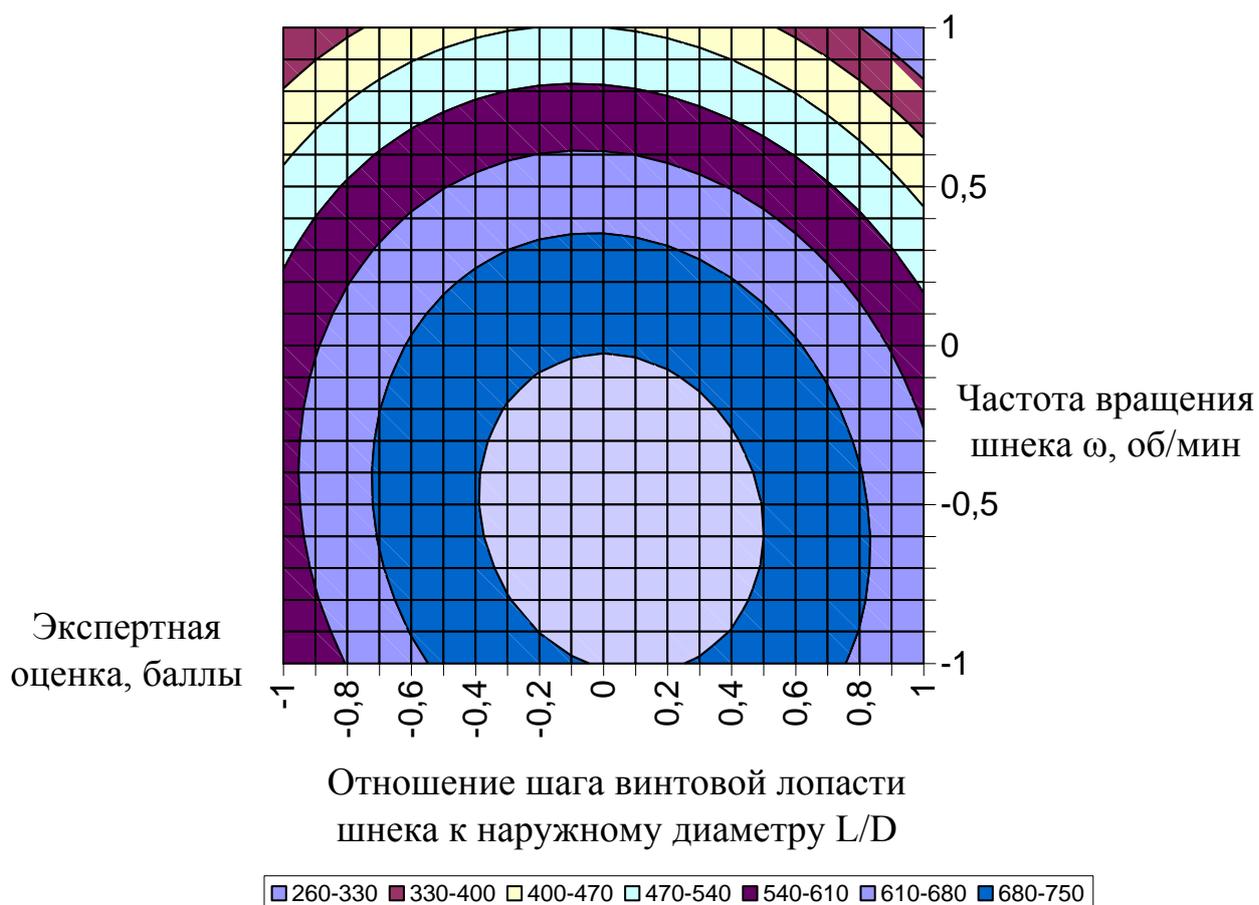
Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

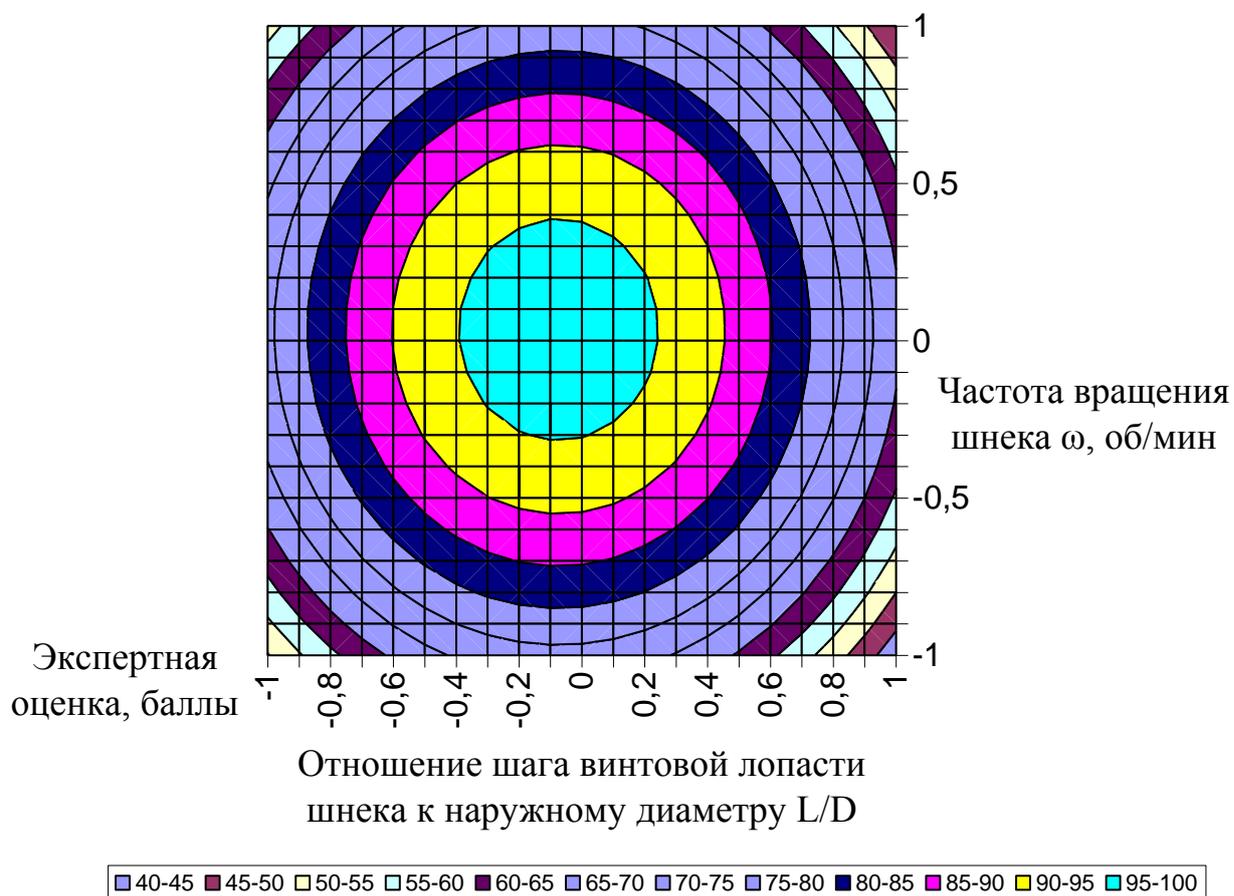


Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

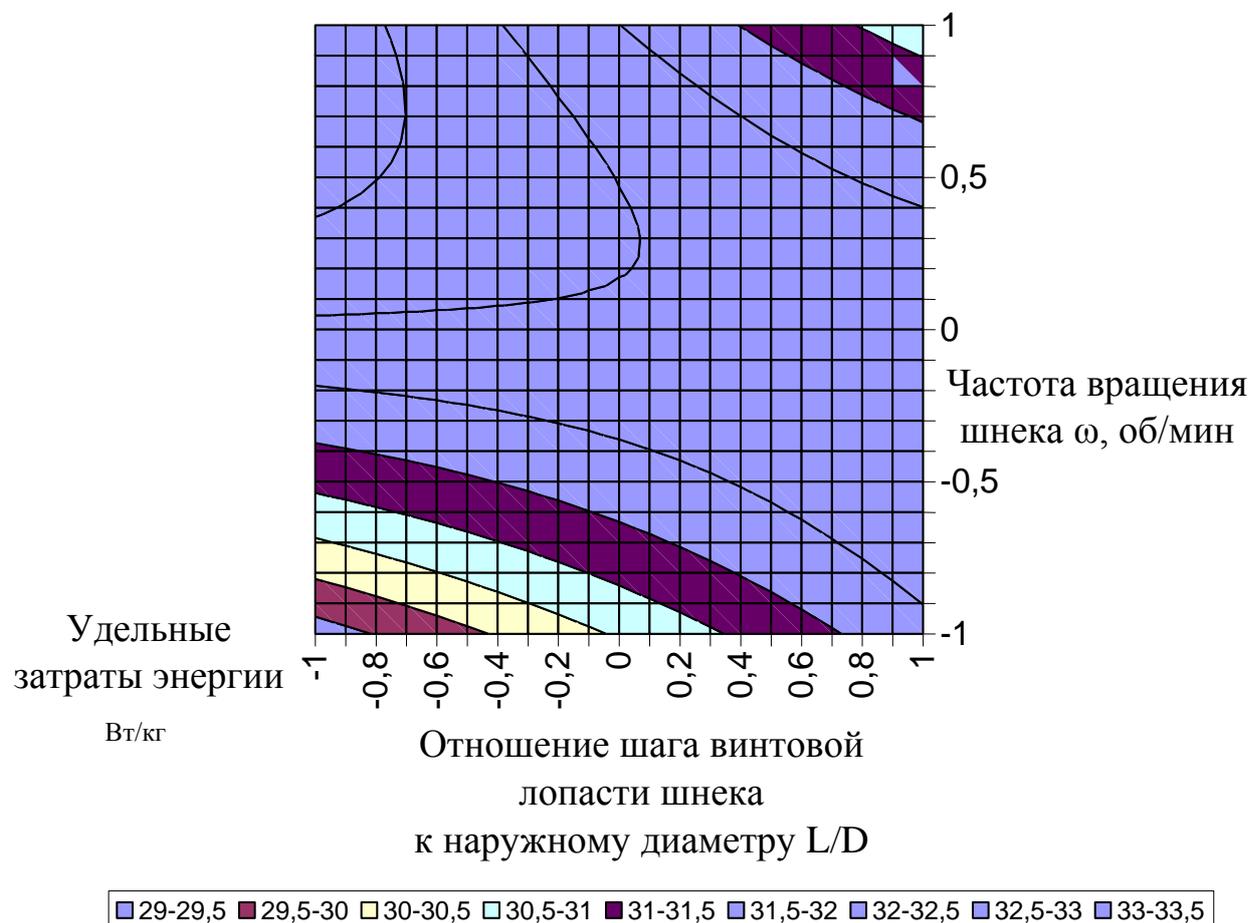


## Приложение 3 1

Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60^{\circ}\text{C}$ )



Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека  
(при температуре сырья на входе в экструдер  $t=60^{\circ}\text{C}$ )



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2548980

## ЭКСТРУДЕР ШНЕКОВЫЙ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Оренбургский государственный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013148712

Приоритет изобретения **31 октября 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **25 марта 2015 г.**

Срок действия патента истекает **31 октября 2033 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Л.Л. Кирий*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2490929

**СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА КОМБИКОРМА**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Оренбургский государственный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012118751

Приоритет изобретения 04 мая 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 августа 2013 г.

Срок действия патента истекает 04 мая 2032 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2517231

## ДРОБИЛКА

Патентообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Оренбургский государственный университет" (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012152227

Приоритет изобретения **04 декабря 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **28 марта 2014 г.**

Срок действия патента истекает **04 декабря 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



## АКТ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

### «Конструкция пресса-экструдера»

Комиссия в составе представителей **ОАО «Оренбургский комбикормовый завод»**: главного инженера **Шулаева Ю. А.**, с одной стороны и декана факультета прикладной биотехнологии и инженерии **ОГУ Короткова Владислава Георгиевича** с другой стороны подписала настоящий акт в том, что научным коллективом в составе: аспирантка **Тимофеева Дарья Владимировна**, студент **Мартынов Николай Николаевич**, проведены производственные испытания модернизированного пресса-экструдера.

Особенностью данного пресса-экструдера является возможность регулирования угла наклона витков шнека по отношению к осевой линии.

По результатам испытаний сделан вывод о том, что использование разработанной конструкции пресса-экструдера позволяет:

- повысить производительность и снизить энергоемкость процесса экструзии, а так же повысить качество получаемых комбикормов.

Декан факультета ФПБИ



**В.Г. Коротков**

«15» декабря 2014г.

Главный инженер  
ОАО «Оренбургский  
комбикормовый завод»



**Ю.А. Шулаев**

«15» декабря 2014г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Оренбургский государственный университет»

Университетский фонд электронных ресурсов

## **СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО РЕСУРСА**

**Прикладная программа «Критериальная оценка  
эффективности технологии экструдирования  
белково-крамало-клетчаткосодержашего сырья»**

Правообладатель: Оренбургский государственный университет

Автор(ы): **Тимофеева Дарья Владимировна,  
Коротков Владислав Георгиевич,  
Попов Валерий Павлович**

Электронный ресурс зарегистрирован «27» октября 2015 г.,  
регистрационный номер 1180

Проректор по учебной работе  
Начальник ОИОТ



А.Д. Проскурин  
Е.В. Дырдина

## АКТ

внедрения в производство научно-технических разработок и  
передового опыта

1. Наименование внедренного мероприятия:  
Влияние кормового продукта, экструдированного на пресс-экструдере с параметрами шнека, изменяющимися непосредственно в процессе работы, на мясную продуктивность крупного рогатого скота
2. Каким научным учреждением мероприятие предложено к внедрению  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт мясного скотоводства», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
3. Наименование хозяйства, его адрес:  
ООО МТС "Красногоры" Оренбургская область, Саракташский район, село Новочеркасск, ул. Центральная, д. 2.
4. Календарные сроки внедрения: 1.03.2016 - 29.04.2016 гг
5. Объем внедрения мероприятия:  
Откорм 30 голов бычков красной степной породы
6. Фактический экономический эффект от внедрения на единицу (га, голову, машину и т.д) и на весь объем внедрения (рублей):  
Среднесуточный прирост живой массы подопытных животных, получавших в составе рациона кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера увеличился на 5,2 %, в отличие от подопытных животных, получавших в составе рациона кормовой продукт экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера
7. Фамилии, должности работников, участвовавших во внедрении мероприятия: Мартынова Д.В., аспирант кафедры пищевой биотехнологии Оренбургского государственного университета, Попов В.П., зав. кафедрой пищевой биотехнологии Оренбургского государственного университета

Аспирант ФГБОУ ВО «ОГУ»

  
подпись

  
расшифровка подписи

Зав. кафедрой ПБТ ФГБОУ  
ВО «ОГУ»

  
подпись

  
расшифровка подписи

Главный советник

  
подпись

  
расшифровка подписи

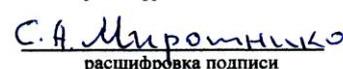
Руководитель хозяйства

  
подпись

  
расшифровка подписи

Директор ФГБНУ «ВНИИМС»

  
подпись

  
расшифровка подписи

Акт составлен

2016 г





# ДИПЛОМ

победителя областной выставки  
научно-технического творчества молодежи  
«НТТМ-2013»

награждается

**Тимофеева Дарья Владимировна**

ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»

за проект

*«Современное представление об экструзии  
крахмало-белково клетчаткосодержащих материалов и  
методика получения из них высококачественных  
экструдированных продуктов»*

Руководители: Попов Валерий Павлович  
Антимонов Станислав Владиславович

Министр образования  
Оренбургской области



**В.А. ЛАБУЗОВ**

г. Оренбург  
2013 г.



# ДИПЛОМ

**победителя областной выставки  
научно-технического творчества молодежи  
«НТТМ-2014»  
награждается**

**КИШКИЛЕВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ  
ТИМОФЕЕВА ДАРЬЯ ВЛАДИМИРОВНА**

**ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»**

*За проект  
«Энерго- и ресурсосберегающие технологии  
производства экструзионных продуктов,  
кормов и кормовых добавок»*

*Научный руководитель*  
**ПОПОВ ВАЛЕРИЙ ПАВЛОВИЧ**

Министр образования  
Оренбургской области



**В.А. ЛАБУЗОВ**

г. Оренбург  
2014 г.



# ДИПЛОМ

**НАГРАЖДАЕТСЯ**  
**ЛАУРЕАТ ПРЕМИИ ГУБЕРНАТОРА ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ**  
**ДЛЯ ТАЛАНТЛИВОЙ МОЛОДЕЖИ**

**Тимофеева Дарья Владимировна**

аспирантка

**ФГБОУ ВПО**  
**«Оренбургский государственный университет»**

**за работу**  
**«Разработка энерго- и ресурсосберегающей технологии**  
**производства экструзионных продуктов на**  
**основе параметрического синтеза»**

Губернатор

Ю.А. Берг

г. Оренбург

*Указ Губернатора Оренбургской области от 12 ноября 2014 г №775-ук.*



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

# СЕРТИФИКАТ

УЧАСТНИКА  
I МЕЖДУНАРОДНОГО МОЛОДЕЖНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ФОРУМА «ЕВРАЗИЯ»

*настоящим сертификатом удостоверяем, что*

**МАРТЫНОВ Николай Николаевич,  
МАРТЫНОВА Дарья Владимировна**

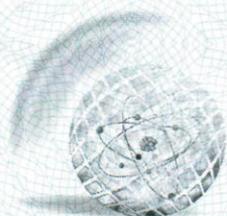
приняли участие в молодежном наукограде «Евразия» с проектом  
**«Шнековый пресс-экструдер»**



И.о. ректора

С.В. Панкова

Оренбург, 2016



**Министерство молодежной политики, спорта и туризма  
Оренбургской области  
Совет молодых ученых и специалистов  
Оренбургской области**

**II Региональный молодежный  
инновационный конвент**

# **СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА**

*Тимофеева Дарья Владимировна*

**Проект**

**РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ НА  
ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА**

**ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»**

Председатель СМУиС  
Оренбургской области



*С.Е. Макаров*





# СЕРТИФИКАТ

Участника  
XLIII Международной научно-практической конференции

«ИННОВАЦИИ В НАУКЕ»

Настоящий сертификат подтверждает участие в конференции  
и публикацию статьи в сборнике трудов

***Тимофеева Дарья Владимировна,  
Кишкилев Сергей Владимирович,  
Антимонов Станислав Владиславович,  
Мартынов Николай Николаевич***

**«РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ ЛИНИИ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОРМОВ И КОРМОВЫХ ДОБАВОК  
С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
И ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРА С ИЗМЕНЕННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ  
РАБОЧЕГО ОРГАНА»**

Председатель оргкомитета –  
канд. мед. наук, д-р психол. наук,  
профессор, академик  
Международной академии наук  
педагогического образования



  
Н.В. Дмитриева

25.03.2015 г.

Новосибирск, 2015 г.



# СЕРТИФИКАТ

Участника

ЛII Международной научно-практической конференции

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ -  
ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ»

Настоящий сертификат подтверждает участие в конференции  
и публикацию статьи в сборнике трудов

***Коротков Владислав Георгиевич,  
Мартынов Николай Николаевич,  
Кишкилев Сергей Владимирович,  
Мартынова Дарья Владимировна,  
Панов Евгений Игоревич***

**«ВЛИЯНИЕ ШОКОВОЙ ЗАМОРОЗКИ НА КАЧЕСТВО И ЭНЕРГОЕМКОСТЬ  
ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ  
И ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ  
РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ»**

Председатель оргкомитета –  
д-р психол. наук, канд. мед. наук,  
профессор, академик  
Международной академии наук  
педагогического образования



Н.В. Дмитриева

18.11.2015 г.

Новосибирск, 2015 г.