

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



**Оренбург
2018**

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

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

Монография

Оренбург 2018

УДК 663/664

ББК 36.81-5

П 42

Рецензент

доктор технических наук, профессор Межуева Л.В.

Авторы: Д.В. Мартынова, В.П. Попов, В.П., Ханин, Г.Б. Зинюхин,
С.В. Антимонов, Г.А. Сидоренко

**П 42 Повышение эффективности процесса производства
экструдированных кормовых продуктов за счет изменения
конструктивных параметров шнека пресс-экструдера:
монография / Д.В. Мартынова, В.П. Попов., В.П. Ханин,
Г.Б. Зинюхин, С.В. Антимонов, Г.А. Сидоренко – Оренбург:
ИПК Университет, 2018. – 208 с.
ISBN 978-5-4417-0738-1**

Проект реализуется при поддержке Федерального агентства по делам молодежи «Росмолодежь» в рамках грантовой программы Всероссийского конкурса молодежных проектов молодежного форума Южного федерального округа «Ростов 2017. Территория успеха».



В монографии рассмотрены процессы и аппаратное оформление производства экструдированных кормовых продуктов на пресс-экструдерах с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека.

Монография предназначена для предприятий, занимающихся переработкой сельскохозяйственного сырья и производством кормовых продуктов; научных работников, преподавателей, аспирантов, студентов высших и среднеспециальных учебных заведений, занимающихся исследованием и разработкой процессов и оборудования для производства экструдированных кормовых продуктов; крестьянско-фермерских хозяйств; проектных организаций при разработке и создании новых и для проведения модернизации существующих пресс-экструдеров.

УДК 633/664

ББК 36.81-5

© Мартынова Д.В., 2018

© Попов В.П., 2018

© Ханин В.П., 2018

© Зинюхин Г.Б., 2018

© Анимонов С.В., 2018

© Сидоренко Г.А., 2018

ISBN 978-5-4417-0738-1

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
1.1 Анализ влияния химического состава кормов на мясную продуктивность сельскохозяйственных животных	8
1.2 Анализ существующего оборудования для производства экструдированных кормовых продуктов	11
1.3 Анализ конструктивных особенностей шнеков пресс-экструдеров ...	18
1.4 Анализ химических и структурно-механических преобразований в экструдруемом материале	24
1.5 Обобщение данных обзора источников литературы	29
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ	32
2.1 Теоретическое обоснование конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека	32
2.2 Анализ существующих математических моделей и методологий описания экструзионных процессов.....	35
2.3 Разработка математической модели уплотнения материала в экструдере.....	43
2.3.1 Разработка математической модели для зоны плавления.....	43
2.3.2 Разработка математической модели для зоны дозирования	51
2.3.3 Движение материала в фильерах матрицы.....	59
3 МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	63
3.1 Общая методика исследований.....	63
3.2 Экспериментальная установка, приборы и оборудование, применяемые при исследованиях	65
3.3 Объект исследования	72
3.4 Методы проведения экспериментальных исследований.....	73
3.4.1 Определение параметров входящих в математическую модель... 73	
3.4.2 Методы определения параметров технологического процесса и физико-химических параметров перерабатываемого материала	76
3.4.3 Методы исследования качества и химического состава перерабатываемого материала и готового продукта	77
3.4.4 Методика оценки питательной ценности зернового сырья и экструдированных кормовых продуктов.....	80
3.4.5 Методика исследования влияния экструдированных кормовых продуктов на мясную продуктивность крупного рогатого скота	83
3.5 Обработка экспериментальных данных	85

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭКСТРУДИРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ПРОТЕКАНИЯ И КАЧЕСТВО ГОТОВОГО КОРМОВОГО ПРОДУКТА	86
4.1 Исследование зависимости структурно-механических и реологических параметров экструдруемого материала от параметров технологического процесса	86
4.2 Анализ соответствия расчетных данных экспериментальным	94
4.3 Исследование влияния параметров технологического процесса на физико-химические параметры зернового сырья при экструзии.....	95
4.4 Исследование изменения химического состава перерабатываемого материала в процессе экструзии.....	101
4.5 Определение оптимальных режимов и параметров процесса экструдирования с целью снижения энергоемкости и повышения качества готового кормового продукта.....	104
5 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	156
5.1 Модернизация одношнекового пресс-экструдера	156
5.2 Результаты производственных испытаний конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека	160
5.3 Результаты исследования изменения питательной ценности зерновых кормов в процессе экструзионной обработки на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера.....	163
5.4 Результаты исследования влияния кормового продукта, полученного на разработанной конструкции пресс-экструдера, на мясную продуктивность крупного рогатого скота	168
5.5 Определение экономической эффективности	174
5.5.1 Определение экономической эффективности от внедрения разработанной конструкции пресс-экструдера.....	174
5.5.2 Определение экономической эффективности применения кормового продукта, полученного на разработанной конструкции пресс-экструдера, в кормлении крупного рогатого скота	179
ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ	182
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	183
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СИМВОЛОВ	184
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	187

ВВЕДЕНИЕ

Производство продукции животноводства отличается высокой трудо- и энергозатратностью при значительных расходах на корма и содержание в условиях наших жестких климатических условий. И в этой ситуации создание конкурентоспособного мясного сырья полностью зависит от принятой системы кормления КРС. Принятые в большинстве случаев в фермерских хозяйствах технологии выращивания молодняка базируются на высокозатратном кормовом материале, когда не оптимизируются объемы съеденного корма с полученным привесом. Корма должны быть так сбалансированы и приготовлены, чтобы они максимально расходовали свой потенциал на продуктивность производства и, следовательно, на приемлемую себестоимость мяса, равнозначную произведенному за рубежом.

В связи с постоянным ростом цен на энергоресурсы и снижением рентабельности сельскохозяйственного производства необходимы новые технологии, позволяющие минимизировать затраты и получать высококачественную продукцию.

Рациональная технология производства кормовых продуктов должна обеспечивать сохранность полезных свойств сырья на каждом этапе его переработки. Для эффективного производства продуктов животноводства необходимо рациональное использование кормов, которое включает в себя методы повышения их биологической и питательной ценности. Для нормального функционирования организма КРС и обеспечения этих животных необходимой энергией очень важно вносить в корма зерновые культуры, так как они являются главным источником углеводов в кормовых рационах КРС. Чаще всего используется зерно злаковых культур: ячменя, пшеницы, кукурузы, овса и др. Большой процент кормового зерна, поступающего в хозяйства, имеет повышенную влажность. В таком зерне быстро возрастает количество плесневых грибов и аэробных бактерий, поэтому оно становится опасным для животных. В свежесобранном зерне даже при невысокой влажности содержится огромное количество микроорганизмов. Развитие содержащихся в зерне плесневых грибов и бактерий приводит к образованию токси-

нов либо при хранении корма, либо в организме животного. Наличие токсинов отмечается даже в подвергнутом сушке зерне влажностью 14%.

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, инактивация ингибиторов пищеварительного тракта, улучшаются вкусовые качества.

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

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

Стремление повысить качество экструдированных кормовых продуктов является актуальным вопросом. Получаемые в результате экструзионной переработки продукты сложны по химическому составу и обладают комплексом различных свойств, которые составляют в совокупности качество продукции и должны быть учтены при расчете процессов и машин и их совершенствовании. Экструдированные корма должны отвечать требованиям нормативно-технической документации, разработанной для половозрастных и видовых групп животных. Государственные стандарты предусматривают большой перечень показателей качества готовой продукции. Помимо требований к сбалансированности кормов по питательным веществам и обменной энергии, в государственных стандартах предъявляются также высокие требования к *структурно-механическим* (крошимость, удельная прочность, влажность) и *органолептическим* показателям (внешний вид, цвет, запах).

При производстве экструдированных кормовых продуктов, качественные показатели готовой продукции зависят как от свойств перерабатываемого материала, так и от конструктивно-режимных параметров

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

В связи с этим является целесообразным создание энергосберегающей конструкции пресс-экструдера, которая позволяла бы поддерживать оптимальные режимы экструдирования и оперативно изменять их в зависимости от свойств исходного сырья.

Актуальность темы определяется основными направлениями развития прогрессивных технологических процессов в комбикормовом производстве, обеспечивающих высокую сохранность кормов и повышенную продуктивность животных. Снижение энергоемкости процесса экструзии и повышение качества экструдированных кормовых продуктов является основной целью при решении большинства задач, связанных с совершенствованием технологических процессов и рабочих органов экструзионного оборудования.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 [78].

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 [6]. Одна из причин высоких затрат корма на единицу производимых продуктов животноводства – недостаток протеина [115].

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 [33].

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. [57]. 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, ме-

тионин, 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. Для крупного рогатого скота наиболее важными являются такие аминокислоты как метионин, лизин и триптофан, которые считаются «критическими» (лимитирующими) аминокислотами. В практике хозяйств животные очень часто испытывают в них недостаток, что неблагоприятно отражается на жизнедеятельности организма [88]. Наиболее требовательны к поступлению незаменимых аминокислот молодые растущие животные. Животные испытывают определенную потребность в отдельных аминокислотах, физиологическая роль которых специфична [56].

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., Левашин В.И. и другие ученые. Результаты исследований выявили, что сбалансированность рациона по питательным веществам – путь к повышению мясной продуктивности и сохранению здоровья животного [19, 20, 22-24, 38, 49, 54, 58, 59].

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 [56].

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 [57].

Маркелова В.Н., Фомичёв Ю.П. и Никанова Л.А. исследовали химический состав экструдированных 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 [2, 64].

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 [146].

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 [148]. Зверкова З.Н. установила, что экструдирование зерна озимой ржи полной спелости снижает со-

держание 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 [42].

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 [140]. Бадмаев Н. А. и Арилов А. Н. установили, что кормление баранчиков экструдированной зерновой смесью положительно влияет на их мясную продуктивность [5].

Как показал проведенный анализ литературных источников, в процессе экструзионной обработки происходят не только структурно-механические преобразования, но и значительные изменения химического состава обрабатываемого материала [111]. Рациональная технология производства экструдированных кормовых продуктов должна обеспечивать сохранность полезных свойств сырья на каждом этапе его переработки [112]. 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. 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) [4].

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 [83]. Классификация пресс-экструдеров представлена на рисунке 1.1.

Вместе с тем, для всех вышеперечисленных пресс-экструдеров общими являются такие характерные признаки, как [18, 95, 144, 147]:

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.

По режиму работы шнековые пресс-экструдеры делят на две группы, отличающиеся термодинамическими особенностями [37, 142]: автогенные и политропные.

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



Рисунок 1.1 – Классификация пресс-экструдеров по данным С.В. Денисова [37]

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 [37, 70].

При экструзионной обработке зернового сырья для получения экструдированных кормовых продуктов рекомендуется применять автогенные режимы [55, 196].

На сегодняшний день существует множество шнековых пресс-экструдеров, отличающихся техническими характеристиками. Был проведен анализ рынка производителей экструзионной техники, предназначенной для производства кормовых продуктов. На рынке представлены как страны Европы, так и Азии. Наиболее известными фирмами, поставляющими экструдеры в Россию являются: American Maplan Corporation, Battenfeld GmbH, BAUSANO & FIGLI S.P.A., Berstorff GmbH,

COSTRUZIONE MECCANICHE LUIGI BANDERA SpA, ENTEK Manufacturing, Inc., ENTEX Rust & Mitschke GmbH, ERMAFA Kunststofftechnik Chemnitz GmbH, Gamma Meccanica SpA, KUHNE GmbH., Ferromatik Milacron Maschinenbau GmbH, Hans Weber Maschinenfabrik, Macchi, и другие [10].

В России экструдеры производятся такими фирмами как: Тригла, ЗПИ, Златоустовский машиностроительный завод ФГУП ПО, КЗТМ, Костромской завод полимерного машиностроения имени Л.Б.Красина ЗАО, КСД – Экструдер, ООО, Маяк-93 НПП, ЗАО, Алеко и другие [10].

Из рассмотренных компаний производящих экструдеры для комбикормовой промышленности (рисунок 1.2) получены следующие данные: на первом месте по производству экструдеров Китай – 18,6 %, на втором месте Италия – 17 % и на третьем месте Германия – 12 %. В число прочих вошли: Украина – 2,2 %; Швейцария, Корейская республика – по 1,6 %; Канада, Франция, Индия, Нидерланды, Испания – по 1,1 %; и Польша, Словения, Словакия, Таиланд, Португалия, Болгария – по 0,6 %. На долю России приходится 9 % производства, она занимает пятое место по производству экструдеров для пищевой промышленности [10].

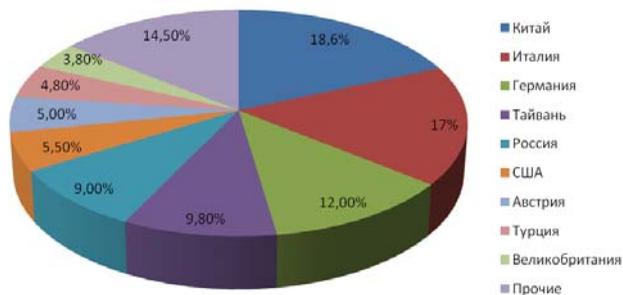


Рисунок 1.2 – Фирмы, производящие экструдеры для комбикормовой промышленности

Таким образом, большинство экструдеров для комбикормовой промышленности поставляется в Россию в основном из-за границы. Из рассмотренных компаний, работающих в данной сфере, только 15 % сами разрабатывают и производят экструдеры, используя собственные технологии производства.

Анализ технических характеристик производимых экструдеров, предназначенных для комбикормовой промышленности, приведен в таблице 1.1. Из таблицы видно, что Китай как крупнейший производитель выпускает экструдеры с производительностью от 400 до 750 кг/ч и установленной мощностью от 160 до 240 кВт, что характерно для крупных предприятий. Экструдеры с производительностью менее 400 кг/ч представлены на рынке в основном странами Западной Европы.

Необходимо отметить, 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.

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 наработок, которые требуют внедрение в производство [79, 114, 125].

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TwinEX (Австрия)	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	34
Max (Италия)	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	28
QT-130S (Тайвань)	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	34
E-MAX (США)	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	
NE – 80 (Тайвань)	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	-	28
Advantage Series (США)	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	50:1
<u>ЭКМ 150Х30</u> (Россия)	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	30
EMS-120 (Тайвань)	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	28
PSM92A (Тайвань)	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	40
NE 12 (Германия)	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+	30
LSJ-150 (Китай)	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	25-33
Э 90х30 (Россия)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	30
ЭКМ2 92/28 Россия	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	92/28
«» – по данным показателям информация отсутствует														

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 [63].

Классификация шнековых пресс-экструдеров представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Классификация шнековых пресс-экструдеров по данным С.В. Денисова, Т.А. Дидык, В.П. Ханина [36, 37, 143]

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 [37, 117].

Широкое применение в промышленности получили шнековые пресс-экструдеры [145, 150], которые выпускаются с одним или двумя шнеками. Однако наибольшее предпочтение при производстве экструдированных кормовых продуктов отдается одношнековым пресс-экструдерам [18, 21, 74, 76, 118, 147].

Основными элементами одношнекового прессующего механизма является шнековая камера, состоящая из шнека и шнекового корпуса, а так же матрица с формующими каналами и загрузочное устройство [17, 50, 81].

Шнековую камеру чаще всего делят на две – три зоны: 1 – зона загрузки; 2 – зона пластификации (плавления); 3 – дозирующая зона (рис. 1.4).

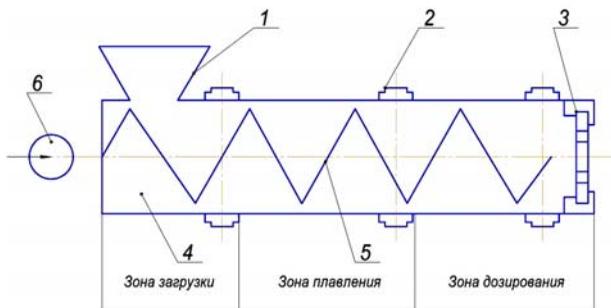


Рисунок 1.4 – Зоны шнековой камеры пресс-экструдера:

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 гомогене-

низации и формования [126-129]. 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 формирующего отверстия.

По форме корпуса шнековые пресс-экструдеры бывают цилиндрические либо конические. Как правило, форма шнека должна повторять форму шнекового корпуса [8, 50]. У пресс-экструдеров конической формы сужение диаметра шнекового корпуса по направлению к формирующему 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 (рис. 1.5).

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 [18, 50].

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 конструктивных решения: каждый участок шнекового корпуса выполнен из двух половин, при этом все детали скреплены хомутами [18].

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 меж-

ду винтовыми лопастями шнека можно также уменьшением высоты лопасти. Зачастую на практике применяются оба конструктивных решения.

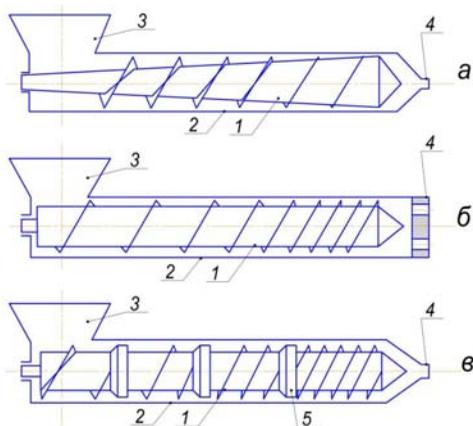


Рисунок 1.5 – Структурные схемы одношнековых прессующих механизмов:
 а – шнек с одной лопастью постоянного шага и переменной высотой лопасти;
 б – шнек с лопастью переменного шага и постоянной высотой лопасти;
 в – шнек, разделенный на секции компрессионными затворами, с переменным шагом лопасти и переменным числом лопастей в секциях; 1 – шнек;
 2 – шнековый цилиндр; 3 – загрузочное устройство; 4 – формирующая матрица; 5 – компрессионный затвор

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 [8, 158].

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 (радиаль-

ная фиксация с аксиально-винтовым креплением на конце вала) [163, 165, 167].

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 [1, 9, 103].

Шнековые модули по выполняемым ими функциям делятся на: транспортирующие, разогревающие, смешивающие [31].

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 (рис. 1.6). Зачастую такие модули применяются в зоне загрузки, но могут использоваться и в других зонах.

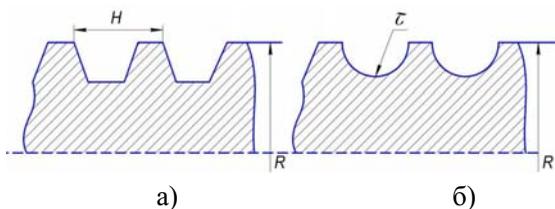


Рисунок 1.6 – Профили шнеков: а) – винтовая канавка в форме трапеции; б) – винтовая канавка в форме полуокружности

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. [11, 36].

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 [15, 61, 116].

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 [39, 121].

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 [61].

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), пласти 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 [3, 170].

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 [65, 171]. 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 (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 [40, 174].

Проведенный анализ существующих конструкций пресс-экструдеров для производства экструдированных кормовых продуктов позволяет сделать вывод о том, что необходимо разработать конструкцию пресс-экструдера с возможностью оперативного изменения параметров шнека: 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 экструдруемом 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 [10, 13, 37].

Основными компонентами сырья, из которого производят кормовые продукты, являются белки, крахмалы и клетчатка [196].

В ходе экструзии обрабатываемый материал проходит целый ряд фазовых превращений: из твердого сыпучего состояния в пластичное, а затем в вязко-текучее [14, 71, 92].

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 [80, 137].

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 [52, 106, 108, 109].

В процессе теплой или варочной экструзионной обработки влажность исходного сырья составляет 20...30%, температура в зоне формования – от 70 до 110 °С, давление 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 крахмало-содержащего 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 [80, 124, 174].

Влажность экструдруемого 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 экструдруемого 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 [170].

В процессе холодной экструзии часто прибегают к принудительному охлаждению, а при теплой или горячей – принудительному подводу тепла к обрабатываемому материалу извне [10, 89].

Одношнековые экструдеры, применяемые при производстве экструдированных кормовых продуктов, в большинстве являются пластицирующими, то есть исходный материал загружается в экструдер в виде твердых частиц [139, 186, 188]. 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. [41, 151]. Одновременно с пластификацией происходит процесс смешивания перерабатываемого материала и образования давления [46, 177].

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 [47, 201].

В процессе горячей 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 тем-

пература 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 [10,46, 177].

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 [47, 53, 157, 172, 200].

Из всех перечисленных параметров наиболее важным является расплав белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья, то есть преобразование в процессе экструзии в вязко-текучее состояние [47]. Переход белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья в вязко-текучее состояние определяет возможность проведения самого процесса и носит название «термопластическая экструзия» [91]. Установлено, что в процессе прессования продолжается денатурация белковых веществ и прессуемый материал приобретает новое строение [18].

В последнее время процесс обработки белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья на пресс-экструдерах все чаще сопоставляют с процессом обработки полимерных материалов [101, 175] в химических реакторах [104]. Особенность обработки белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья в пресс-экструдере – проведение процесса при высоких температурах и давлении, больших деформациях, активном перемешивании полисахаридов [105, 152, 202]. Сильное разрушение структуры частиц прессуемого материала связано с самим характе-

ром 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. [9, 28, 195]. 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 [1, 138].

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 [29, 48, 84, 160, 173, 178, 181]. В связи с этим возникает необходимость математического моделирования процесса экструзии, и проведение экспериментальных исследований для установления зависимости параметров экструдированного материала от параметров технологического процесса, в частности от конструктивных особенностей шнека перерабатываемого пресс-экструдера.

1.5 Обобщение данных обзора 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. Для крупного рогатого скота наиболее важными являются такие аминокислоты как метионин, лизин и триптофан, которые считаются «критическими» (лимитирующими) аминокислотами.

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. В процессе экструзионной обработки зерновых кормов увеличивается их питательная и энергетическая ценность. При скармливании экструдированных кормовых продуктов наблюдается повышение перевариваемости в рубце.

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 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.

Шнековую камеру пресс-экструдера чаще всего делят на две – три зоны: зона загрузки, зона пластификации (плавления), дозирующая зона. При производстве экструдированных кормовых продуктов является важным обеспечение 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 энергоемкости процесса экструзии. А также одновременно создание как можно более высокой плотности перерабатываемого материала, с целью получения готового продукта на выходе из экструдера более плотной структуры. 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 показал, что в одношнековых экструдерах применяются в основном шнеки с нарезкой по всей длине, а также постоянным шагом, равным наружному диаметру шнека. Недостатком при этом является отсутствие возможности оперативного изменения параметров шнека (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 процесса экструзии. Следовательно, 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.

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 энергетической ценности и продуктивном действии 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 фильера, 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 них 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.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ

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 $H_{р.ш.} = 0,65$ 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 ω_s 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. Рауендаль выделил два состояния, в которых находится перерабатываемый материал в шнековой камере: сыпучее и вязкопластичное. 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. 3.4.1.

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 техни-

чески 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 (рис. 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 внутреннем диаметре шнека $D_s = 0,04$ м и условии соблюдения равновесия между нагрузками на шнек и резьбовой вал) должен иметь резьбу $M = 20 \times 1,5$, что соответствует изменению шага винтовой линии на 1,5 мм за один оборот резьбового вала.

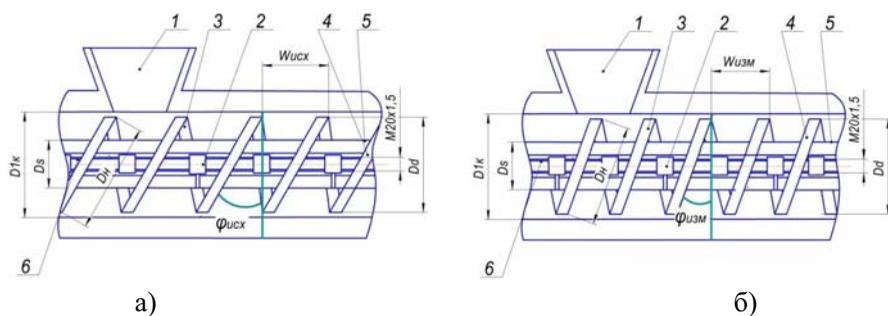


Рисунок 2.1 – Изменение угла наклона и шага витков шнека пресс-экструдера: а) исходный угол наклона и шаг витков шнека, б) измененный угол наклона и шаг витков шнека; 1 – загрузочное устройство; 2 – втулка с установленным пальцем; 3 – шнековая камера; 4 – витки шнека; 5 – шнек; 6 – резьбовой вал в теле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

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

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

$\mathcal{C}_{об}$ – число оборотов резьбового вала, расположенного в теле шнека.

2.2 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. [29, 48].

В дальнейшем теоретические исследования экструзии продолжились в работах Н. Potente [112], В.И. Янкова [150], О.И. Скульского [139], J. Martin [175], В. Elbirly, J.T. Lindt [160], В.А. Силина, В.В. Скачкова [84], и др.

Изучением работы одношнековых пресс-экструдеров занимались Г.К. Бер-ман [15], J.P. Melcion, P. Colonna [181], J.L. Rossen, R.C. Miller [197], Н.И. Назаров [89], Ю.А. Мачихин, И.Э. Груздев [34], Б.М. Азаров [25], А.В. Горбатов [30], В.П. Юрьев, А.Н. Богатырев [149] и другие [10, 32, 40, 102, 110].

Математические модели, описывающие одношнековую экструзионную обработку [16] делят на три группы: реологические, гидродинамические и геометрические [72].

К математическим моделям, входящим в группу гидродинамических, относят модели, разработанные такими учеными, как Г. Шенкель [73], Э. Бернхардт [11], Д.М. Мак-Келви [74] и др. Ими получены урав-

нения, 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 исследователями, 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:

$$P = \left(\pi (D^2 - d_D^2) (H - e) \frac{60n\gamma}{4} \right) \eta_D \left(1 - \frac{P_\Gamma}{P_{\max}} \right), \quad (2.4)$$

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;

γ – плотность расплава, которая зависит от давления и температуры, кг/м³;

η_D – коэффициент осевого перемещения расплава вдоль канала шнека дозирующей зоны;

P_Γ – 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 [61].

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 [51], М. Рейнер, У.Л. Уилкинсон [75], Д. Маруччи [77], Д.М. Мак-Келви [26], С. Мидлман, Р.Д. Степа-нов, Р.В. Торнер [27], П.М. Огибалов [120], Г.В. Виноградов и Л.Я. Малкин, Д.Х. Чанг [91]. 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 пластификации и разработана классическая модель плавления Тадмора [45]. 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 [194] и Вермелен [184, 198] 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 [3, 199]. 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 [141], 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:

$$\tau_{x'y} = m_r a_T \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n, \quad (2.5)$$

где $a_T = \exp[\alpha_T(T_m - T)]$

В работе Раувендаала [191] 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:

$$\tau_{x'y} = m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy}, \quad (2.6)$$

где $m = m_0 \exp[\alpha(T_0 - T)]$

Эдмондсон и Феннер [156, 161, 162, 183,] 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

[164]. Донован [176] развил математическую модель Тадмора посредством устранения допущения постоянной скорости твердого слоя и включения постепенного нагревания твердого слоя в зоне плавления. Как упоминалось ранее, Шапиро [194] и Вермулен [184, 198] при анализе процесса плавления учитывали увеличение толщины слоя расплава с ростом поперечного размера канала. Шапиро, Пирсон с сотрудниками усовершенствовали теоретический анализ Тадмора [159, 168, 180, 194]. 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 Лиллелет [185] 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 [169] 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 [189] исследовали размягчение аморфных полимеров. В работах Чанга [190, 153] 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 [198]. 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 [154, 155].

Чанг с сотрудниками получили простые аналитические выражения для предсказания характера плавления полимеров [192] 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:

$$\frac{dM_p}{dA} = M_p^0 \rho_m \Delta v, \quad (2.7)$$

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. Талейсник [164], Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихина и А.В. Горбатов [179]. Анализируя эти модели можно сказать, что свойства экструдруемых материалов описывались первоначально моделью ньютоновской жидкости [26, 44]. Однако в дальнейшем большинством исследователей [27] 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 [44, 94]. Наиболее широкое распространение получило уравнение Френкеля-Эйринга, которое описывает изменение вязкости от температуры [97].

Е. Спандиаровым [96] 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 [15, 123].

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 [35] 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 [12] предложили рассматривать движение материала в канале шнека при теплом режиме, как с проскальзыванием, так и без него. Т.М. Зубкова [43] 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. Ханин [143]. 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 [51], при прессовании – С.С. Вяловым [98], Г.М. Ждановичем [99], М.Ю. Бальшиным.

Модель сыпучих тел для описания поведения материала, прессуемого шнеком, была использована Г. Шенкелем [85], В.А. Силиным [7], Е.С. Макаровым [100], 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 [93] при описании вязкопластичной массы, движущейся в предматричной камере пресс-экструдера [120] и в коническом канале матрицы [119].

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 [12], а И.А. Бондаревой [11] 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 из них 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 экструдруемом материале, и не содержат ограничения на физико-химические и органолептические преобразования.

2.3 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 [11]. 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 характеризуют 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. Обрабатываемый 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).

2.3.1 Разработка математической модели для зоны плавления

Первый всесторонний анализ движения твердого материала в одношнековых экструдерах был проведен Дарнеллом и Молом в 1956 г. [107]. 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 [107]:

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 [107].

На рисунке 2.2 представлена схема, иллюстрирующая различные силы, которые действуют на элемент твердой пробки. При этом вводится допущение, что шнек неподвижен, а цилиндр вращается.

F_r – сила трения между твердой пробкой и телом шнека задается уравнением

$$F_r = PWdx f_s, \quad (2.8)$$

где P – давление, Па;

f_s – динамический коэффициент трения на поверхности шнека,

W – расстояние между витками шнека, м.

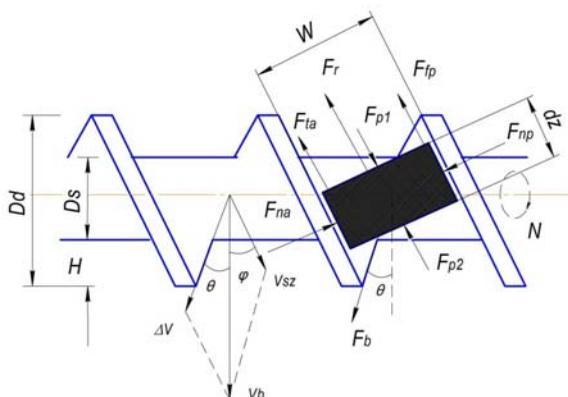


Рисунок 2.2 – Силы, действующие на элемент твердого слоя, и соответствующая диаграмма скоростей (К. Раувендааль «Экструзия полимеров», 2008 г.) [147]: F_r – сила трения между твердой пробкой и телом шнека; F_{na} – нормальная сила, действующая на твердый слой на активной стороне нарезки; F_{np} – нормальная 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; φ – угол наклона витков шнека; θ – угол с плоскостью, перпендикулярной оси шнека; D_d – диаметр шнека внешний; D_s – диаметр шнека внутренний; v_b – скорость цилиндра; v_{sz} – скоростью твердого слоя; Δv – разность скоростей между цилиндром и твердым слоем

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

$$F_{na} = PHdx + F^* , \quad (2.9)$$

где H – глубина канала, м;

F – дополнительная нормальная сила, Н.

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

$$F_{np} = PHdx, \quad (2.10)$$

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

$$F_{fa} = F_{na}f_s, \quad (2.11)$$

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

$$F_{fp} = PHdx f_s, \quad (2.12)$$

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

$$F_{p1} = WH P, \quad (2.13)$$

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

$$F_{p2} = WH(P+dP), \quad (2.14)$$

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:

$$F_b = PWdx f_b, \quad (2.15)$$

где f_b – динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра.

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

$$\vec{\Delta v} = \vec{v}_b - \vec{v}_{sx}, \quad (2.16)$$

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 $\vec{\Delta v}$ и F_b . Угол θ представляет собой угол, определяющий направление движения твердого материала. Если этот угол определен, тогда скорость твердого слоя может быть вычислена непосредственно из уравнения:

$$v_{sx} = v_b \left[\cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{\operatorname{tg}(\theta + \varphi)} \right], \quad (2.17a)$$

где φ – угол наклона витков шнека

Уравнение (2.17a) может быть переписано следующим образом:

$$v_{sx} = v_b \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)}, \quad (2.17b)$$

Разность векторов скоростей Δv между скоростью цилиндра v_b и скоростью твердого слоя v_{sx} определяется следующим образом:

$$\Delta v = (v_b^2 + v_{sx}^2 - 2|v_b||v_{sx}|\cos \varphi)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.18)$$

Выражение для угла движения твердого материала θ получается из баланса силы в направлении оси канала:

$$PWdx f_b [\cos(\theta + \varphi) - f_s \sin(\theta + \varphi)] = WHdP + Pdx f_s (W + 2H), \quad (2.19)$$

Для того чтобы получить зависимость давления от расстояния в направлении оси канала, уравнение (2.19) следует проинтегрировать. Давление при $x=0$ равно $P(x=0) = P_0$. Тогда решение уравнения представляется следующим образом:

$$\ln \frac{P}{P_0} = \left\{ \frac{f_b}{H} [\cos(\theta + \varphi) - f_s \sin(\theta + \varphi)] - f_s \left(\frac{W + 2H}{Wh} \right) \right\} x, \quad (2.20)$$

где x – расстояние от загрузочного устройства до измерительного элемента.

Уравнение (2.20) 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 (2.20) может быть преобразовано таким образом, чтобы получить законченную форму выражения для угла движения твердого материала:

$$\theta = \arcsin \left[\frac{(1 + f_s^2 - k^2)^{\frac{1}{2}} - f_s k}{1 + f_s^2} \right] - \varphi, \quad (2.21)$$

где

$$k = \frac{H}{f_b x} \ln \frac{P}{P_0} + \frac{f_s}{f_b} \left(1 - \frac{2H}{W} \right), \quad (2.22)$$

На основании уравнения (2.22) 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 (2.20). Однако угол движения в уравнении (2.20) должен быть выражен как функция скорости твердой пробки. Профиль давления, полу-

ченный на основании уравнения (2.20) (модель плоского канала), может быть записан следующим образом:

$$P(x) = P_0 \exp \left[\left(f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \frac{x}{H} \right], \text{ Па}, \quad (2.23)$$

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

φ – угол наклона витков шнека;

θ – 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 (2.23) 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 (рис. 2.3) в каждом поперечном сечении крутящий момент прессования можно определить с помощью формулы:

$$M_x = \frac{D_s + D_d}{2} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_d'^2 - D_s'^2) \cdot P_x, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.24)$$

где M_x – крутящий момент прессования в поперечном сечении, Н·м;
 D_d – диаметр шнека внешний, м;
 D_s – диаметр шнека внутренний, м;
 P_x – давление, Па.

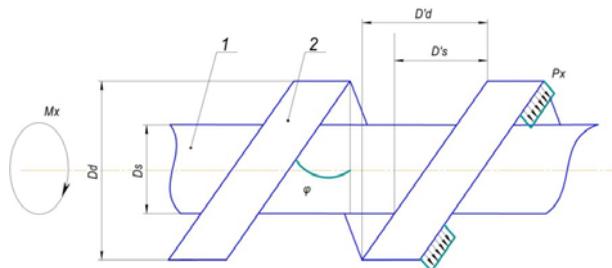


Рисунок 2.3 – Параметры шнека пресс-экструдера: 1 – вал шнека; 2 – винтовая лопасть шнека; D_d – диаметр шнека внешний; D_s – диаметр шнека внутренний; P_x – давление; φ – угол наклона винтовой лопасти шнека; M_x – крутящий момент

Преобразовав, получим:

$$M_x = \frac{\pi}{8 \cdot \cos^2 \varphi} (D_d + D_s) \cdot (D_d'^2 - D_s'^2) \cdot P_x, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.25)$$

Проинтегрировав произведение формул (2.23) и (2.25) по x , получим крутящий момент в конце зоны плавления:

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

$$M_{nl} = \frac{\pi \cdot P_0 \cdot (D_d + D_s) \cdot (D_d'^2 - D_s'^2) / 8 \cdot \cos^2 \varphi}{\left[\left(f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \cdot \frac{x}{H} \right]} \cdot \exp \left[\left(f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \cdot \frac{x}{H} \right], \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.26)$$

где M_{nl} – крутящий момент в конце зоны плавления.

2.3.2 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. [51, 102, 143] рассмотрели модель прессующего механизма в координатах Ox , Oy , и Oz , которая представлена на рисунке 2.4.

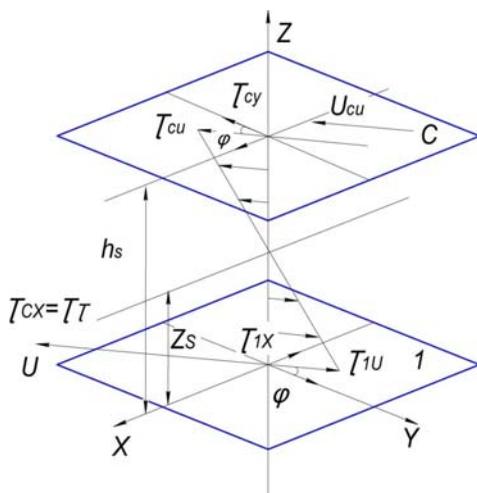


Рисунок 2.4 – Модель прессующего механизма по данным В.Ю. Полищука, В.Г. Короткова, В.П. Ханина [51, 102, 143]

Здесь направление оси Ox совпадает с направлением оси корпуса шнека, а направление оси Oy – окружное. При этом ось канала шнека Ou образует с осью Oy угол φ .

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 τ_{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 τ_{Cx} равно:

$$\tau_{Cy} = \tau_{Cx} \cdot tg\varphi, \quad (2.27)$$

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

$$\tau_{Cu} = \tau_{Cy} \cos\varphi = \tau_{Cx} \sin\varphi, \quad (2.28)$$

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

$$\tau_{z1} = \frac{d\tau}{dz} (z - z_s), \text{ где } z \geq z_s, \quad (2.29)$$

$$\tau_{z2} = \frac{d\tau}{dz} (z_s - z), \text{ где } z \leq z_s, \quad (2.30)$$

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

Из рисунка 2.3 видно, что:

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{\tau_{Cu}}{h_s - z_s} \quad (2.31)$$

Преобразуя формулы (2.29) и (2.30) с учетом (2.31) получим:

$$\tau_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{h_s - z_s} (z - z_s), \text{ где } z \geq z_s \quad (2.32)$$

$$\tau_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{h_s - z_s} (z_s - z), \text{ где } z \leq z_s \quad (2.33)$$

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 (рис. 2.5) представляет последовательное соединение элементов Гука с модулем упругости G и Ньютона с вязкостью η , при этом на них действует одинаковое напряжение τ .

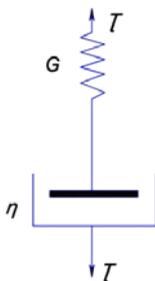


Рисунок 2.5 – Модель Максвелла

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 успе-

ет 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:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta}, \text{ с}^{-1}, \quad (2.34)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ;

G – модуль упругости, Па ;

η – вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

τ – касательное напряжение, Па ;

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

Для измерения изменения касательного напряжения используют два понятия: скорость изменения касательного напряжения $\dot{\tau}$, используемое в реологическом уравнении максвелла (2.34) и относительное изменение касательного напряжения $\frac{d\tau}{dz}$, используемое в моделях С.Ю. Полищука с соавторами (уравнение 2.31). В первом случае модуль упругости G используется с единицей измерения Па (Мачихин Ю.А. «Инженерная реология пищевых материалов» 1981 г), во втором случае – с единицей измерения $\text{Па}\cdot\text{с}/\text{м}$. В связи с тем, что при выводе формул 2.31 – 2.33 учитывалось изменение касательного напряжения от расстояния, на которое производится сдвиг, в дальнейшем при выводе формул вводим поправочный коэффициент $\nu_G = 1 \text{ с}/\text{м}$.

Учитывая уравнения (2.32), (2.33) и (2.34) получаем:

$$\dot{\gamma}_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{1}{G \cdot \nu_G} + \frac{z - z_s}{\eta} \right), \text{ где } z \geq z_s \quad (2.35)$$

$$\dot{\gamma}_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{1}{G \cdot \nu_G} + \frac{z_s - z}{\eta} \right), \text{ где } z \leq z_s \quad (2.36)$$

Проинтегрируем уравнения (2.35) и (2.36), с учетом, что скорость сдвига материала можно выразить через относительную скорость с помощью выражения:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_z}{dz} \quad (2.37)$$

Приняв условия прилипания на пластинах, получаем:

$$v_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{z}{G \cdot \nu_G} + \frac{z^2 - 2z_s \cdot z}{2\eta} \right) + C_1, \text{ где } z \geq z_s \quad (2.38)$$

$$v_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{z}{G \cdot \nu_G} + \frac{2z_s \cdot z - z^2}{2\eta} \right) + C_2, \text{ где } z \leq z_s \quad (2.39)$$

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

$$C_1 = v_{Cu} - \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{h_s}{G \cdot \nu_G} + \frac{h_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right), \quad (2.40)$$

$$C_2 = v_0 \quad (2.41)$$

Тогда:

$$v_{z1} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{z - h_s}{G \cdot \nu_G} + \frac{z^2 - h_s^2 + 2z_s(h_s - z)}{2\eta} \right) + v_{Cu}, \text{ где } z \geq z_s \quad (2.42)$$

$$v_{z2} = \frac{\tau_{Cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{z}{G \cdot \nu_G} + \frac{2z_s \cdot z - z^2}{2\eta} \right) + v_0, \text{ где } z \leq z_s \quad (2.43)$$

Если при $z = z_s$, $v_{z1} = v_{z2}$, тогда с учетом формул (2.42), (2.43) получим:

$$v_{cu} = v_0 + \frac{\tau_{cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{h_s}{G \cdot v_G} + \frac{h_s^2 + 2z_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right), \text{ м/с} \quad (2.44)$$

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

$$\omega'_3 \cdot D_d / 2 \cdot \cos\varphi = \frac{\tau_{cu}}{(h_s - z_s)} \cdot \left(\frac{h_s}{G \cdot v_G} + \frac{h_s^2 + 2z_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right), \quad (2.45)$$

где ω'_3 – частота вращения шнека, с^{-1} ;

Выразим из уравнения касательное напряжение у стенки:

$$\tau_{Cu} = \frac{\omega'_3 \cdot D_d / 2 \cdot \cos\varphi \cdot (h_s - z_s)}{\left(\frac{h_s}{G \cdot v_G} + \frac{h_s^2 + 2z_s^2 - 2z_s \cdot h_s}{2\eta} \right)}, \text{ Па}, \quad (2.46)$$

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:

$$\tau_{Cu} = \frac{\omega'_3 \cdot D_d \cdot \cos\varphi \cdot G \cdot v_G \cdot \eta}{4\eta + h_s \cdot G \cdot v_G}, \text{ Па}, \quad (2.47)$$

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

$$M_\partial = \frac{\omega'_3 \cdot D_d \cdot \cos\varphi \cdot G \cdot v_G \cdot \eta}{4\eta + h_s \cdot G \cdot v_G} 2\pi r_1 R^2, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.48)$$

где M_∂ – крутящий момент в конце зоны дозирования, $\text{Н}\cdot\text{м}$;

h_s – высота лопасти шнека, м;

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

D_{1K} – внутренний диаметр корпуса, м;

x_1 – расстояние от начала зоны плавления до измерительного элемента, м.

Таким образом, из уравнения (2.48) крутящий момент в дозирующей зоне M_δ 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 (2.42) и (2.43) интегрированием элементарных потоков:

$$Q = \int_{z_s}^{h_s} v_{z_1} dz + \int_0^{z_s} v_{z_2} dz = \left(\frac{\tau_{Cu}}{h_s - z_s} \right) \times \quad , \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.49)$$

$$\times \left(\frac{z_s^2 \cdot h_s - z_s^3 + 2z_s \cdot h_s^2 - h_s^3}{3\eta} + \frac{2z_s^2 - h_s^2}{2G \cdot v_G} \right) + v_{Cu} (h_s - z_s) + v_0 z_s$$

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

$$\dot{\gamma}_{cp} = \frac{1}{h_s - z_s} \int_{z_s}^{h_s} \dot{\gamma}_{z_1} dz + \frac{1}{z} \int_0^{z_s} \dot{\gamma}_{z_2} dz =$$

$$= \frac{\tau_{cu}}{(h_s - z_s)^2} \cdot \left(\frac{h_s}{G \cdot v_G} + \frac{(h_s - 2z_s)^2}{2\eta} \right), \text{ с}^{-1}, \quad (2.50)$$

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 (2.34) в следующем виде:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\tau}{G \cdot dt} + \frac{\tau}{\eta}, \text{ с}^{-1}, \quad (2.51)$$

Преобразовав, получим уравнение с разделяемыми переменными:

$$\frac{d\tau}{\tau - \dot{\gamma} \cdot \eta} = \frac{G}{\eta} dt, \quad (2.52)$$

После его интегрирования, получим:

$$\tau - \dot{\gamma} \cdot \eta = \left(e^{-\frac{G}{\eta} t} \right) \cdot C', \text{ где } C' = e^C, \quad (2.53)$$

$$\text{или } \tau = \dot{\gamma} \eta + \left(e^{-\frac{G}{\eta} t} \right) \cdot C', \quad (2.54)$$

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

$$0 = \dot{\gamma} \cdot \eta + e^0 \cdot C', \text{ откуда } C' = -\dot{\gamma} \cdot \eta, \quad (2.55)$$

Уравнение для касательного напряжения примет вид:

$$\tau = (\dot{\gamma} \cdot \eta) \cdot \left(1 - e^{-\frac{G}{\eta} t} \right), \text{ Па}, \quad (2.56)$$

Учитывая, что для измеряющей насадки

$$M_n = \tau \cdot 2\pi \cdot L_1 \cdot R_1^2, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.57)$$

где M_n – крутящий момент, измеряемый насадкой, Н·м;

L_1 – длина зазора, м;

R_1 – расстояние до зазора, м.

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

$$M_n = (\dot{\gamma} \cdot \eta) \cdot \left(1 - e^{-\frac{G}{\eta} t} \right) \cdot 2\pi L_1 \cdot R_1^2, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.58)$$

2.3.3 Движение материала в фильерах матрицы

При прессовании вязкопластичного материала через фильеры матрицы наблюдается послойное движение материала. По данным Шрейдер М.Ю. [98] для случая проскальзывания материала по стенкам фильеры давление и касательные напряжения в поперечном сечении матрицы подчиняются параболическому закону [103] (рис.2.6).

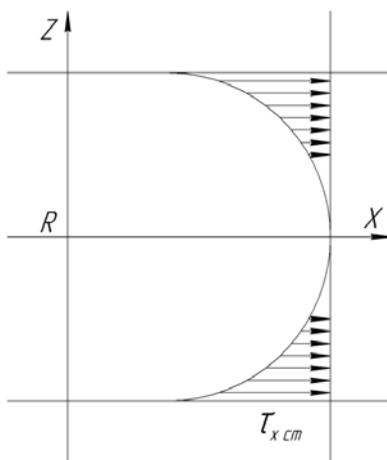


Рисунок 2.6 – Распределение касательных напряжений в фильере матрицы

Максимальное напряжение τ_{cm} возникает у стенок фильеры, в результате сопротивления матрицы в местах отсутствия отверстий, а в центре поперечного сечения фильеры оно равно нулю. Для распределения касательных напряжений при данных условиях получено уравнение:

$$\tau = \tau_{cm} \left(1 - \frac{z^2}{R_2^2}\right), \text{ Па}, \quad (2.59)$$

где τ_{cm} – касательное напряжение у стенки фильеры, Па;
 R_2 – радиус фильеры, м;
 z – координата вдоль оси Z , м.

Из уравнения (2.46) следует:

$$\frac{d\tau}{dz} = -2\tau_{cm} \cdot \frac{z}{R_2^2}, \quad (2.60)$$

Тогда с учетом уравнения (2.34) получим:

$$\dot{\gamma} = \frac{-2 \cdot \tau_{cm} \cdot z}{G \cdot R_2^2} + \frac{\tau_{cm} \cdot \left(1 - \frac{z^2}{R_2^2}\right)}{\eta}, \text{ с}^{-1}, \quad (2.61)$$

Согласно уравнению (2.36) в результате преобразования уравнения (2.53) получим:

$$v_z = \frac{-\tau_{cm}}{G \cdot R_2^2} \cdot z^2 + \frac{\tau_{cm}}{\eta} \cdot z - \frac{\tau_{cm}}{3R_2^2 \cdot \eta} \cdot z^3 + C, \quad (2.62)$$

Движение прессуемого материала в канале фильеры осесимметрично, тогда при условии, что $v = const$, а $z = 0$

$$v_z = C \quad (2.63)$$

Тогда с учетом уравнений (2.59) и (2.60) получим:

$$\frac{-\tau_{cm}}{G \cdot R_2^2} \cdot z^2 + \frac{\tau_{cm}}{\eta} \cdot z - \frac{\tau_{cm}}{3R_2^2 \cdot \eta} \cdot z^3 = 0, \quad (2.64)$$

Отсюда при $z = R$ получим выражение:

$$\frac{-\tau_{cm}}{G} + \frac{\tau_{cm}}{\eta} \cdot R_2 - \frac{\tau_{cm} \cdot R_2}{3\eta} = 0, \quad (2.65)$$

В результате найдем

$$\tau_{cm} = \frac{3G \cdot R_2}{2G \cdot R_2 - 3 \cdot \eta}, \text{ Па}, \quad (2.66)$$

Где реологические параметры материала примем определяемые при входе в матрицу.

Объемный расход через одну фильеру матрицы найдем по формуле:

$$Q_\phi = v_z \cdot S_\phi, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.67)$$

где S_ϕ – суммарное поперечное сечение отверстия матрицы.

Объемный расход материала через матрицу определяется по формуле:

$$Q_M = g_f \cdot Q_\phi, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.68)$$

Среднюю скорость сдвига в фильерах матрицы найдем из выражения:

$$\dot{\gamma}_{u.c.p.m} = \frac{1}{R_2} \int_0^{R_2} \dot{\gamma} \cdot z dz, \quad (2.69)$$

В результате преобразований получим:

$$\dot{\gamma}_{u.c.p.m} = R_2 \cdot \left(\frac{\tau_{cm}}{4\eta} \right) - \frac{2\tau_{cm}}{3G}, \text{ с}^{-1}, \quad (2.70)$$

Полученные зависимости для расчетных крутящих моментов в конце зон плавления (2.26) и дозирования (2.48) и крутящих моментов, определяемых при помощи устройств для их измерения (2.58) дают возможность управлять процессом экструзии.

3 МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

3.1 Общая методика исследований

При проведении экспериментов использовали методику, представленную на рисунке 3.1

Исследования были выполнены на лабораторном стенде, разработанном на базе малогабаритного пресс-экструдера ПЭШ-60/4, выпускаемого ОАО «Орстан», дополненным 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 шнека), 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.

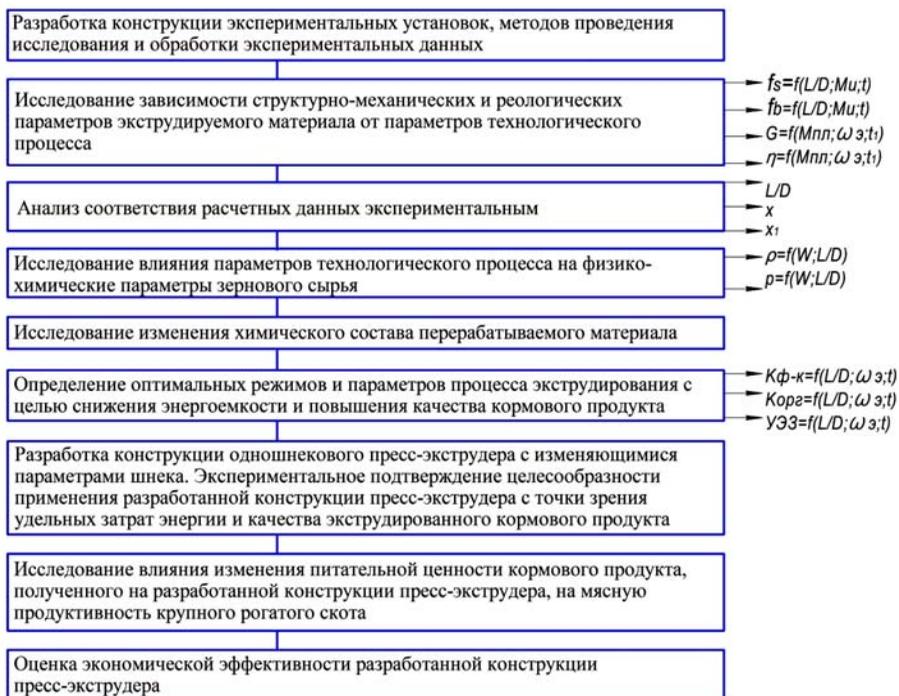


Рисунок 3.1 – Методика проведения экспериментальных исследований:

f_s – динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра;

f_b – динамический коэффициент трения 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; η – вязкость; $M_{пл}$ – крутящий момент в

конце зоны плавления; $\omega_э$ – 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; ρ – плотность материала в зонах шнековой камеры; p – полное напряжение, возникающее в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры; W – влажность перерабатываемого материала

3.2 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

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 формирования).

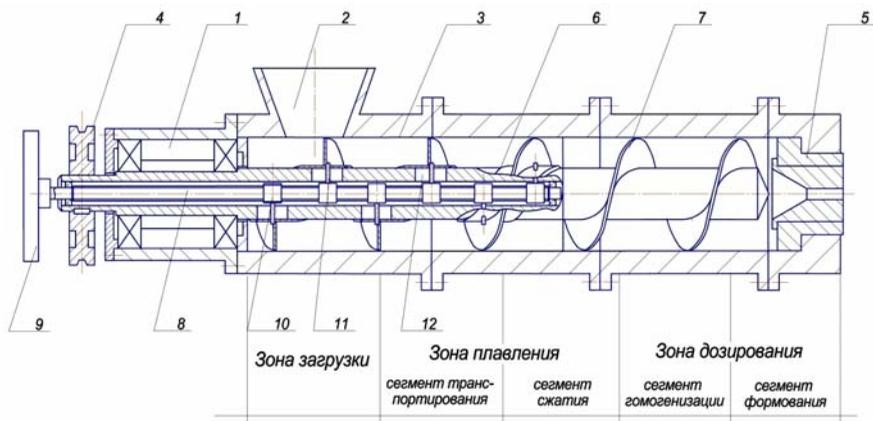


Рисунок 3.2 – Конструкция одношнекового пресс-экструдера:

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

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 [130, 131], 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 (2.26) и (2.48)).

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 (патент РФ №2548980).

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.

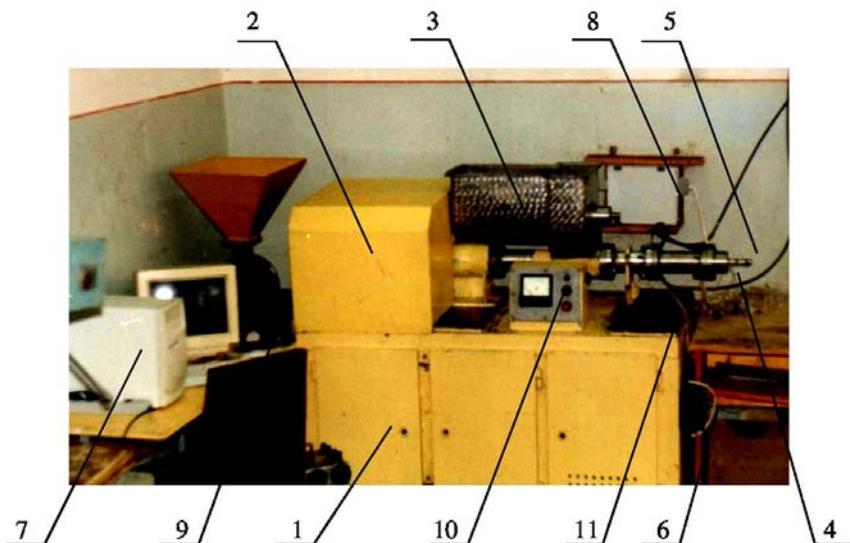


Рисунок 3.3 – Общий вид пресс-экструдера с измерительной аппаратурой:
 1 – станина; 2 – редуктор; 3 – загрузочная воронка; 4 – цилиндрический корпус
 шнека; 5 – формующая головка; 6 – пульт управления; 7 – персональная
 ЭВМ; 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – тахометр;
 10 – амперметр; 11 – ваттметр

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.

Обрабатываемый материал загружается в пресс-экструдер через загрузочную воронку 3. Запуск и остановку пресс-экструдера осуществляет пультом управления 6. Регистрация показаний измеряющих датчиков фиксируется на компьютере 7, который получает сигналы от АЦП LC-212F 8. Измерение угловой скорости шнека проводится тахо-

метром 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.

В работе были использованы разработанные ранее на факультете прикладной биотехнологии и инженерии Оренбургского государственного университета прибор ПМ (рис. 3.5) для определения физико-механических свойств экструдатов [149] и прибор для определения адгезионных и когезионных напряжений (патент РФ №2293316), возникающих при растяжении и сжатии материалов, извлекаемых из зон экструдера [55, 186].

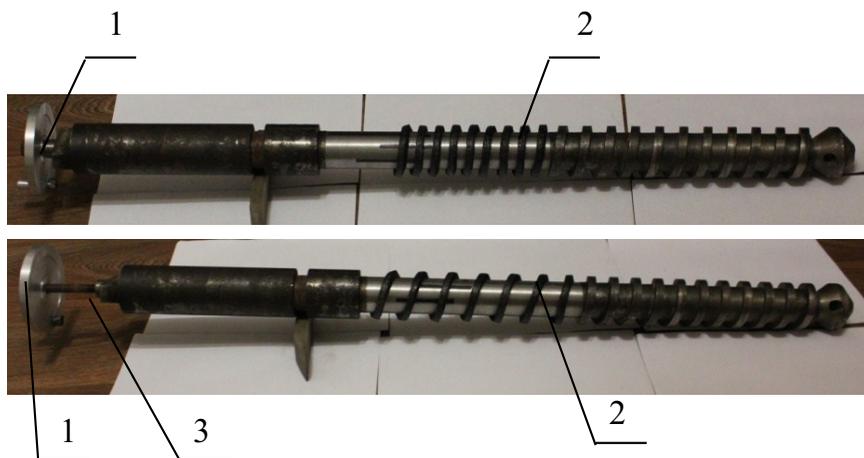


Рисунок 3.4 – Разработанная конструкция шнека: 1 – ручка; 2 – витки шнека; 3 – резьбовой винт в теле шнека

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

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 [82, 166, 182], предназначенный для измерения внутреннего трения сыпучих материалов при установившемся сдвиге (рис. 3.6).

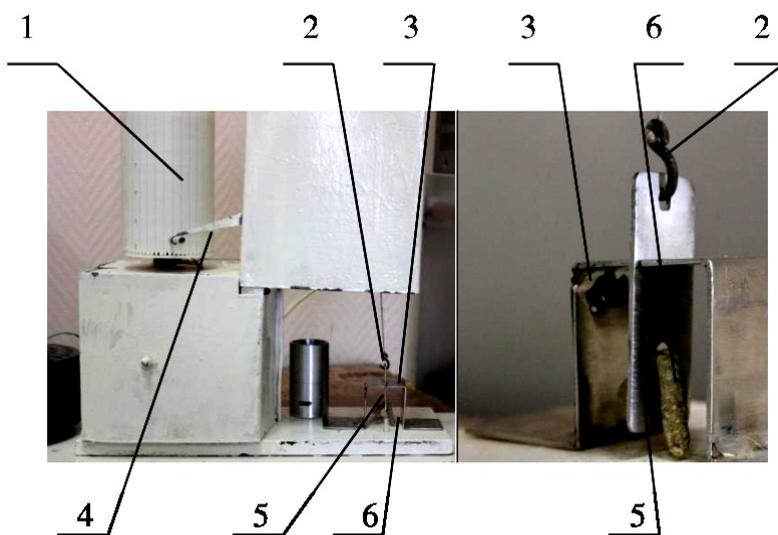


Рисунок 3.5 – Устройство для определения физико-химических свойств экструдированных изделий: 1 – измерительный цилиндр; 2 – крючок; 3 – опорная пластина; 4 – стрелка; 5 – планка с отверстием; 6 – образец экструдированного полуфабриката

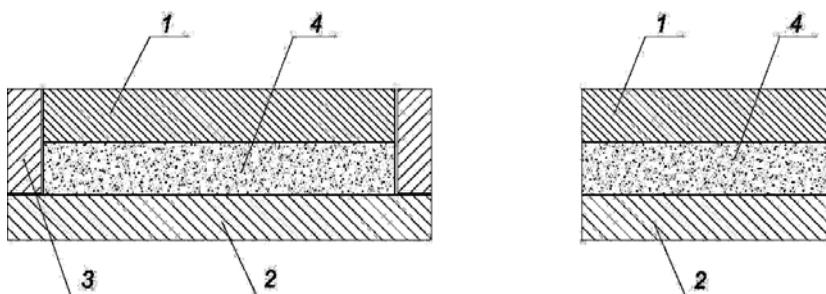


Рисунок 3.6 – Прибор для измерения сдвиговых характеристик сыпучих материалов: 1 – верхняя пластина, 2 – нижняя пластина, 3 – ограничитель, 4 – исследуемый продукт

Устройство для измерения динамического коэффициента трения представлено на рисунке 3.7.

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 [66].

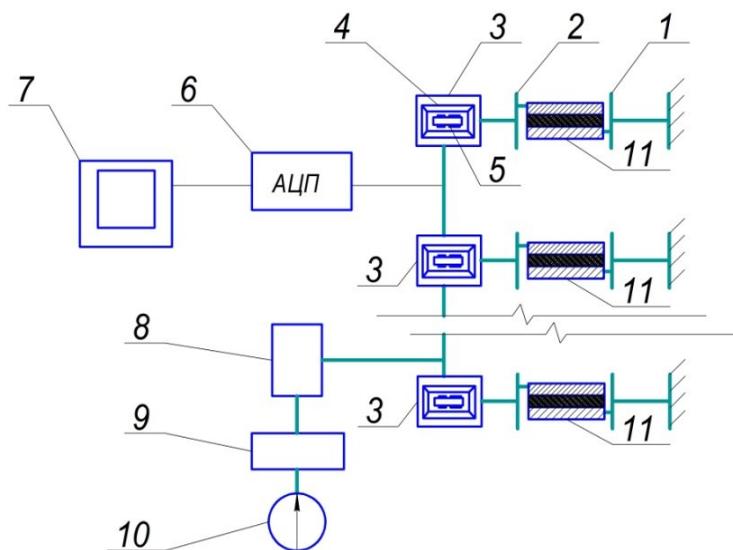


Рисунок 3.7 – Устройство для определения динамического коэффициента трения: 1 – пассивный захват; 2 – активный захват; 3 – нагрузитель; 4 – металлическая пластина; 5 – тензодатчики; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – компьютер; 8 – редуктор; 9 – вариатор; 10 – электродвигатель; 11 – измерительный 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 нагружателя 3 в обратном направлении [66]. Когда нагружатель 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.

3.3 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.

3.4 Методы проведения экспериментальных исследований

3.4.1 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 η . 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 (рис. 3.8).

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

В результате адгезионно-когезионных взаимодействий обрабатываемого материала, крутящий момент передается от шнека 3 к измерительному устройству, расположенному в районе формирующей головки 4 на расстоянии 0.6 м от загрузочного устройства 1. По степени закручивания устройства, измеряющего крутящий момент в конце зоны дозирования M_{θ} , 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.

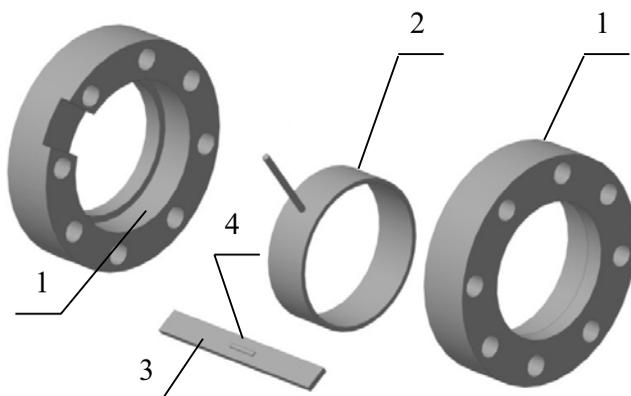


Рисунок 3.9 – Устройство для измерения крутящих моментов: 1 – фланец; 2 – цилиндрическая вставка с рычагом; 3 – пластина; 4 – тензодатчик

Устройство для измерения крутящих моментов (рис. 3.9) 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 [179].

3.4.2 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 σ – нормальное напряжение, кПа
 τ – касательное напряжение, кПа

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

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 (рис. 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:

$$\nu_{3Э} = \frac{\sum N_i}{Q} \quad (3.3)$$

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 [98].

3.4.3 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 (рис. 3.10а) определяли в соответствии с ГОСТ 28497-90 «Комбикорма, сырье гра-

нулированные. Методы определения крошимости» на приборе ППГ – 2, представленном на рисунке 3.10б.



Рисунок 3.10 – Устройство для определения крошимости готовых экструдированных изделий ППГ – 2: а) – экструдат; б) – прибор 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 (рис. 3.11) для контроля прочности ИПМ-1 (аналог прибора Строгонова). Принцип работы устройства основан на воздействии линейно-нарастающей нагрузки на образец экструдированного изделия, помещенного на две опоры, до его разрушения и фиксации величины нагрузки, при которой произошло разрушение образца. После нажатия кнопки «Пуск» пуансон начинает опускаться. Начиная с момента касания пуансоном испытуемого образца, индикатор показывает значение нагрузки в каждый момент времени. При этом микропроцессор осуществляет сравнение каждого измеренного значения нагрузки с предыдущим. Если это значение оказалось

меньше предыдущего (момент разрушения образца), то на индикаторах фиксируется предыдущее значение, как величина разрушающей нагрузки.

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.



Рисунок 3.11 – Устройство для контроля прочности ИППМ-1: 1– образец экструдированного кормового продукта; 2 – пуансон; 3 – кожух прибора; 4 – опоры для образца; 5 – гайки для регулировки расстояния между опорами; 6 – плата микропроцессора; 7 – выключатель сети; 8 – кнопка «Пуск»; 9 – кнопка «Стоп».

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.

3.4.4 Методика оценки питательной ценности зернового сырья и 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:

$$ОЭ = 0,73 \cdot \frac{ВЭ}{СВ} \cdot (СВ - 1,05 \cdot сК), \text{ МДж} \quad (3.6)$$

где *ОЭ* – обменная энергия, МДж;

ВЭ – валовая энергия, МДж;

СВ – количество сухого вещества, кг;

сК – содержание сырой клетчатки, кг.

Валовую энергию рассчитывали по формуле:

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

где $cП$ – количество сырого протеина, кг;

$cЖ$ – количество сырого жира, кг;

$cК$ – 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:

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

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

$ОЭ_{поддержк}$ – 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):

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

где $ЧЭ_{поддержк}$ – чистая энергия поддержания, МДж

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

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

где m – живая масса, кг.

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

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

Исследования перевариваемости «in situ» 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 (рис. 3.12). Опыт проводили в трех повторностях.

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.

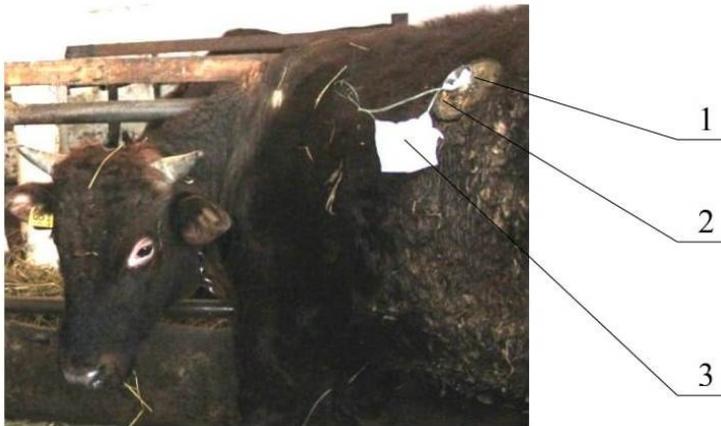


Рисунок 3.12 – Исследования перевариваемости сухой массы корма на молодняке крупного рогатого скота с фистулой в рубце: 1 – фистула; 2 – леска; 3 – нейлоновый мешочек с кормом

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.

3.4.5 Методика исследования влияния экструдированных кормовых продуктов на мясную продуктивность крупного рогатого скота

Для исследования влияния кормовых продуктов экструдированных на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера на

мясную продуктивность, был поставлен научно-хозяйственный опыт на молодняке крупного рогатого скота. Для проведения опыта было отобрано 30 десятимесячных бычков красной степной породы. 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 молодняке крупного рогатого скота контролировали индивидуальным ежемесячным взвешиванием утром до кормления. Полученные данные являлись основой для расчета абсолютного и среднесуточного прироста подопытных бычков.

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	ОР1
2 опытная	10	60	ОР2

Примечание: ОР – основной рацион; ОР1 – 30% заменено на кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера; ОР2 – 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.

3.5 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 2³», 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.

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

4.1 Исследование зависимости структурно-механических и реологических параметров экструдированного материала от параметров технологического процесса

С целью изучения зависимости структурно-механических и реологических параметров экструдированного 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 [66].

Изменение угла наклона витков шнека и расстояния между ними целесообразно выражать 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 ПФЭ³, 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 [107]:

$$v_{тв.м.} = \frac{\rho W H v_b}{\cos \varphi} \cong \gamma \pi^2 D^2 H \omega_3 \tan \varphi = \gamma \pi^2 D^2 H \omega_3 L / D, \quad (4.1)$$

где γ – объемный вес перерабатываемого материала, кг/м³;

D – внешний диаметр шнека, м;

W – расстояние между витками шнека, м;

H – глубина канала шнека, м;

v_b – скорость цилиндра, м/с;

φ – угол наклона витков шнека;

ω_3 – частота вращения шнека, рад/с⁻¹

– 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, P	-1	0	1
Натуральные значения, P , 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 ПФЭ³ в условных единицах представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – План эксперимента

№ опыта	$v_{тв.м.}$	P	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:

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

Величины со штрихом натуральные.

Измерение крутящего момента при помощи цилиндрических насадок на корпусе 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;

ω_1 – частота вращения ротора, с⁻¹;

R_1 – расстояние до зазора, м;

a – ширина зазора, м.

В экструдере при установившемся режиме скорость деформации постоянна, учитывая формулу (2.56) 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 η, 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 $M_{пл} = 11,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$, температуре перерабатываемого материала $t_1 = 105^\circ\text{C}$ и частоте вращения ротора $\omega_1 = 120 \text{ об/мин}$, полученная при постоянной скорости сдвига $\dot{\gamma} = 743,75 \text{ с}^{-1}$.

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 ($M_{пл}$), частота вращения шнека ω_3 и температура перерабатываемого материала (t_1), меняющиеся в пределах:

$$\begin{aligned} 5,6H \cdot м \leq M_{пл} \leq 16,8H \cdot м; \\ 60об / мин \leq \omega_3 \leq 180об / мин; \\ 60^0C \leq t_1 \leq 120^0C. \end{aligned} \quad (4.9)$$

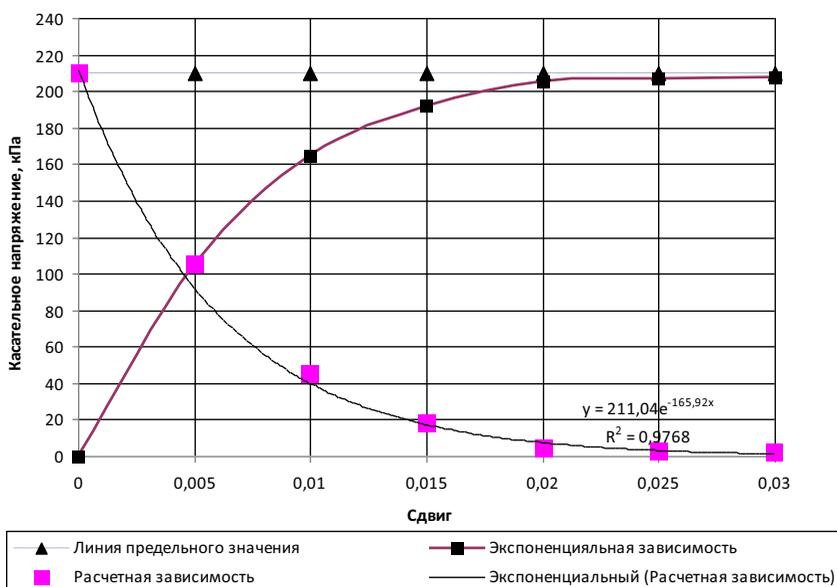


Рисунок 4.1 – Зависимость касательного напряжения от сдвига при крутящем моменте в конце зоны плавления $M_{пл} = 11,7$ Н·м, температуре перерабатываемого материала $t_1 = 105^0C$ и частоте вращения ротора $\omega_1 = 120$ об/мин.

Для установления зависимости реологических характеристик перерабатываемого материала при экструдировании от величины крутящего момента в конце зоны плавления, температуры перерабатываемого материала и частоте 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:

$$\eta = 0,283 + 0,0903 \cdot M_{nl} - 0,00442 \cdot \omega_3 - 0,00182 \cdot t_1 - 0,0045 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 - 0,006 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 \cdot t_1 - 0,0068 \cdot M_{nl}^2 \quad (4.10a)$$

$$G = 342,8 + 19,053 \cdot M_{nl} + 8,507 \cdot \omega_3 + 4 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 + 8 \cdot M_{nl} \cdot \omega_3 \cdot t_1 + 7,83 \cdot M_{nl}^2 - 8,756 \cdot t^2 \quad (4.10b)$$

где величины M_{nl} , ω_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°C , 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 (рис. 3.2). По результатам экспериментов строились графики, с одновременным нанесением расчетных (в соответствии с разработанной математической 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.

Сравнивая экспериментальные данные с результатами моделирования, можно сделать следующий вывод: экспериментальные значения крутящих моментов в конце зон загрузки M_u , плавления M_{nl} 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 экс-

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

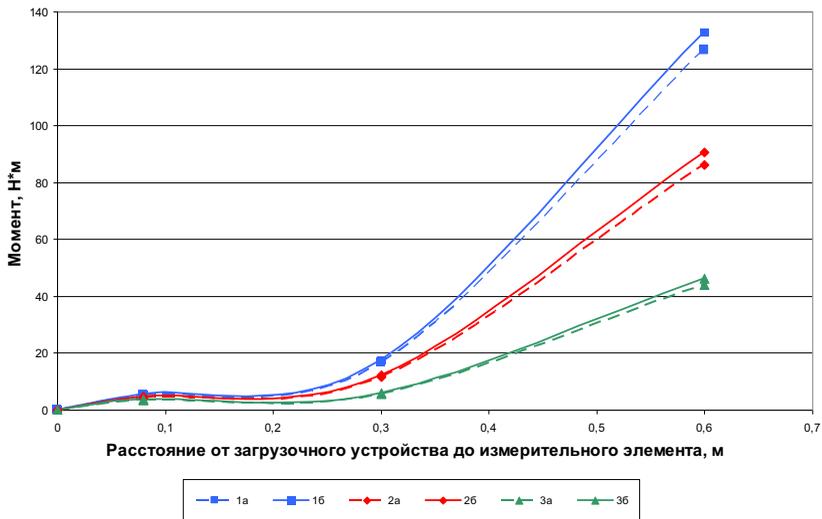


Рисунок 4.2 – Изменение крутящих моментов в пресс-экструдере при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру 0,4 0,8, 1,2, частоте вращения шнека 120 об/мин и температуре сырья на входе в экструдер 40 °С: 1а, 1б – величина крутящего момента при L/D=0,4; 2а, 2б – величина крутящего момента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

4.3 Исследование влияния параметров технологического процесса на физико-химические параметры зернового сырья при экструзии

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 [127]. Экспериментальные исследования проводились на стандартной конструкции пресс-экструдера при рекомендуемых режимах и разработанной конструкции 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 ρ 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 стандартной конструкции пресс-экструдера представлены на графиках 4.3 и 4.4.

Из графика, представленного на рисунке 4.3 мы видим, что результаты свидетельствуют о недостаточном уплотнении материала в сегменте сжатия зоны плавления 1100 кг/м^3 по сравнению с 1300 кг/м^3 , которые получаем на выходе из экструдера. А также о недостаточной плотности материала в сегменте формования зоны дозирования 1300 кг/м^3 , по сравнению с 1400 кг/м^3 , достигаемых на гидравлических прессах, при использовании аналогичного сырья. Это не позволяет получать кормовой продукт на выходе из экструдера достаточно плотной структуры, соответствующей техническим требованиям ГОСТ 23513-79 «Брикеты и гранулы кормовые. Технические условия».

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

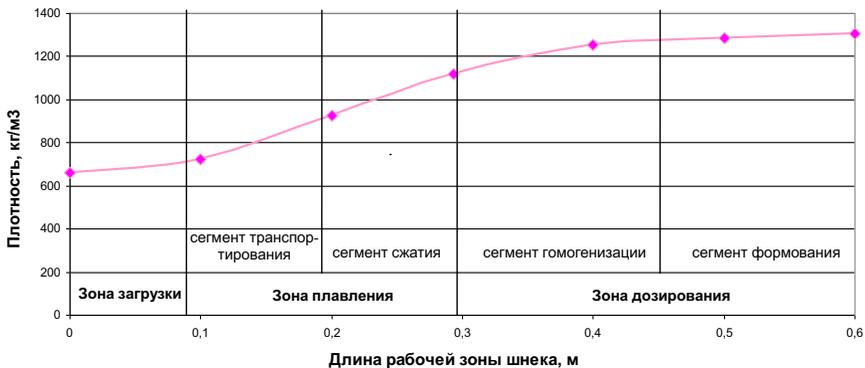


Рисунок 4.3 – Плотность перерабатываемого материала в зонах шнековой камеры экструдера, кг/м³

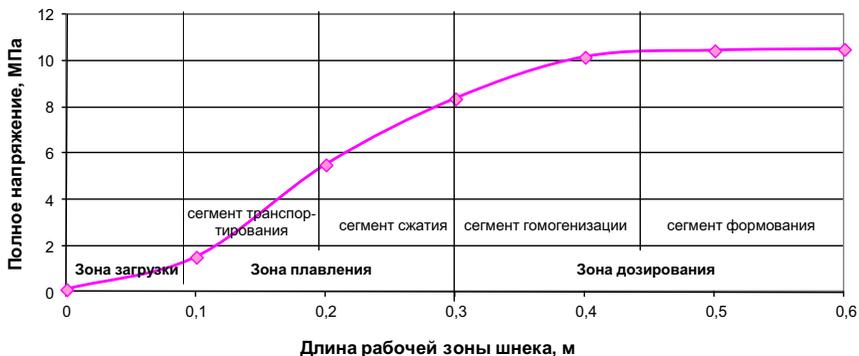


Рисунок 4.4 – Полное напряжение, возникающее в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры экструдера, МПа

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

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 [9] 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 [132, 133], 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 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 формования зоны дозирования до величины 1400 кг/м^3 , сопоставимой с достигаемой на гидравлических прессах при использовании аналогичного сырья [67, 134].

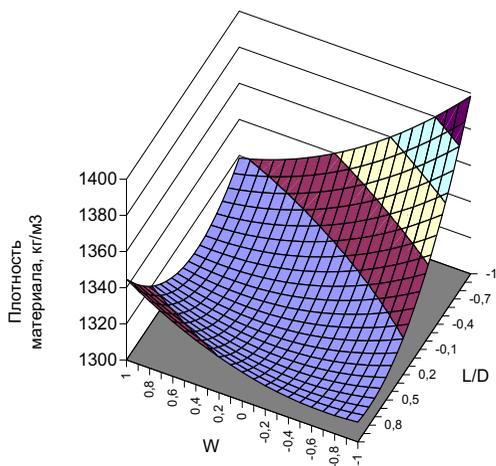


Рисунок 4.5 – Зависимость плотности материала в зонах шнековой камеры экструдера от влажности и отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру

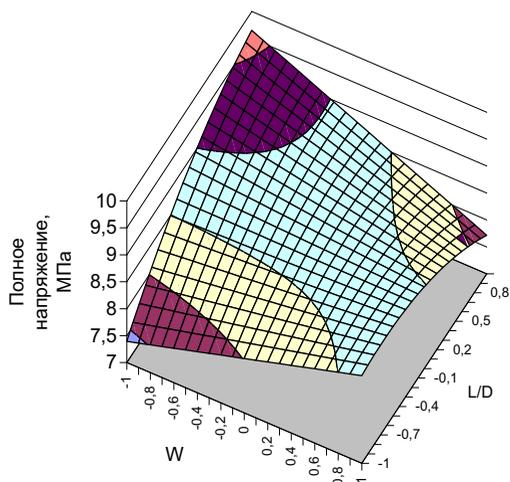


Рисунок 4.6 – Зависимость полного напряжения в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры экструдера от влажности и отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру

Из рисунка 4.6 видно, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека к 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.

В связи с вышесказанным можно сделать вывод, что изменение отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру позволит проводить процесс экструзии в энергосберегающих режимах и получать на выходе готовый кормовой продукт более плотной структуры, соответствующей техническим требованиям ГОСТ 23513-79 «Брикеты и гранулы кормовые. Технические условия».

Так как степень уплотнения перерабатываемого материала имеет непосредственную взаимосвязь с температурой и давлением и как следствие влияет на глубину химических преобразований в перерабатываемом материале, является целесообразным изучить изменение химического состава зернового сырья в процессе экструзионной обработки на разработанной конструкции пресс-экструдера.

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 [134, 135], 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 (табл. 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 в процессе 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 %, с 413,38 до 584,1 мг на 100 г, триптофана – на 21 %, метионина – 3, 6 %, цистина – на 41 %, аспарагиновой кислоты – на 3,5 %, аланина – на 2,1 %.

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 – на 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 результате химических преобразований в перерабатываемом материале происходит увеличение обменной энергии на 3,2 % и кормовых единиц на 6,7 %.

Следует отметить, что основные преобразования в зерновой смеси происходят в сегменте сжатия зоны плавления и сегменте гомогенизации зоны дозирования [67, 134].

Таблица 4.5 – Результаты химического анализа перерабатываемого материала

Показатели	Единица измерения	Химический состав перерабатываемого материала						
		Зона загрузки			Зона плавления		Зона дозирования	
		сегмент портирования	сегмент Сжатия	сегмент гомогенизации	сегмент	сегмент формирования	сегмент	
Сырой протеин	г на кг	110 ± 0,55	111,56 ± 0,56	112,38 ± 0,56				113,52 ± 0,57
Сырая клетчатка	г на кг	61 ± 0,31	59 ± 0,29	50,5 ± 0,27				49,5 ± 0,24
Сырой жир	г на кг	26 ± 0,13	26,2 ± 0,13	26,3 ± 0,13				26,57 ± 0,13
Сухое вещество	%	87,71 ± 0,44	87,6 ± 0,43	87,2 ± 0,43				87,06 ± 0,43
Сырая зола	%	2,42 ± 0,01	2,39 ± 0,01	2,19 ± 0,01				2,17 ± 0,01
Обменная Энергия	МДж	11,05 ± 0,05	11,20 ± 0,05	11,35 ± 0,06				11,42 ± 0,06
Кормовые единицы		0,98 ± 0,005	1,01 ± 0,005	1,04 ± 0,005				1,05 ± 0,006
Аминокислоты								
Лизин		365,96 ± 1,83	378,7 ± 1,89	403,11 ± 2,01				412,49 ± 2,06
Метионин		173,64 ± 0,87	174,76 ± 0,87	178,46 ± 0,89				180,21 ± 0,90
Цистин		228,6 ± 1,14	235,5 ± 1,17	274,6 ± 1,37				390,77 ± 1,95
Триптофан		127,88 ± 0,64	131,5 ± 0,65	152,4 ± 0,76				161,89 ± 0,81
Аспарагиновая кислота		630,96 ± 3,15	636,8 ± 3,18	649,8 ± 3,24				653,82 ± 3,26
Треонин		344,08 ± 1,72	327,3 ± 1,63	297,3 ± 1,48				285,47 ± 1,43
Серин		454,8 ± 2,27	442,6 ± 2,21	407,1 ± 2,03				394,27 ± 1,97
Глутаминовая кислота	мг на 100 г	2509,02 ± 12,54	2439,4 ± 12,19	2296,8 ± 11,48				2254,53 ± 11,27
Пролин		1380,22 ± 6,54	1305,6 ± 6,52	1198,1 ± 5,99				1168,75 ± 5,84
Глицин		413,38 ± 2,06	539,9 ± 2,69	455,1 ± 2,27				584,1 ± 2,92
Аланин		440,13 ± 2,2	442,38 ± 2,21	446,88 ± 2,23				449,77 ± 2,25
Валин		540,74 ± 2,7	528,24 ± 2,64	503,24 ± 2,51				490,35 ± 2,45

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 внутри-молекулярного взаимодействия в экструдруемом материале, вызванным повышением его плотности [67, 136].

Результаты исследования химического состава экструдруемого материала показали, что при производстве экструдированных кормовых продуктов на разработанной конструкции шнека пресс-экструдера происходят глубокие химические преобразования в перерабатываемом материале, в результате которых увеличивается обменная энергия корма на 3,2 %, кормовые единицы на 6,7 %, а также биологическая полноценность протеина корма по наиболее важным для крупного рогатого скота незаменимым аминокислотам: лизин, метионин и триптофан.

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 2³ 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 кормового продукта;
- комплексный показатель физико-химических свойств экструдированного кормового продукта;
- удельные затраты энергии на проведение процесса экструдирования.

Оценку качества готового кормового продукта проводили с помощью разработанного комплексного показателя физико-химических свойств [68].

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 «Комбикорма гранулированные. Общие технические условия». Так как большое количество показателей качества вызвало 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 (КФ-Х).

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 таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Шкала перевода значений показателей качества экструдированного кормового продукта в баллы качества

Наименование показателя качества	Значение показателя в натуральном выражении	Присваиваемый балл качества, B_k	Коэффициент значимости показателя, $K_{зн}$	Произведение $B_k \cdot K_{зн}$
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 ²	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

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.

Первоначально была проведена серия однофакторных экспериментов по изучению зависимости комплексного показателя органолептических и физико-химических свойств и удельных затрат энергии от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала. Графики зависимости комплексного показателя органолептических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала представлены на рисунках 4.7 – 4.12.

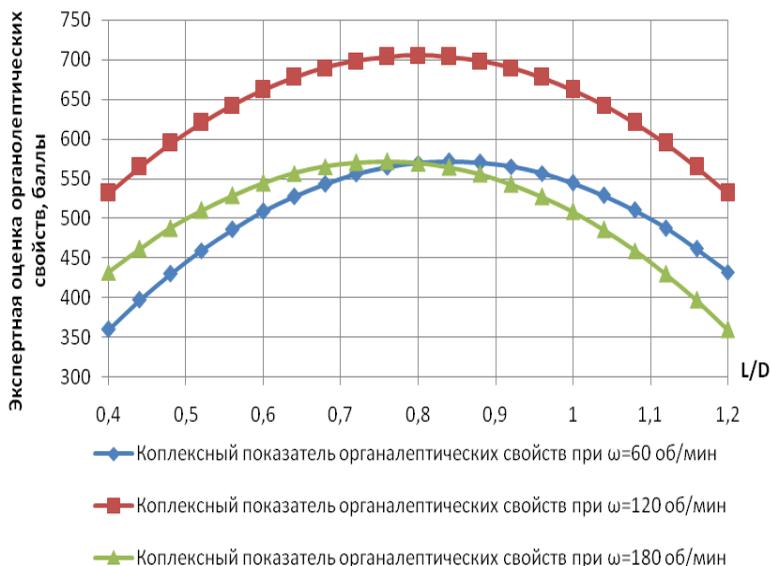


Рисунок 4.7 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^\circ\text{C}$

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.7 видно, что комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру до $L/D = 0,8$, при дальнейшем уве-

личении значения L/D от 0,8 до 1,2, комплексный показатель органолептических свойств снижается.

При частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^0C$ максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 572$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{орг} = 360,4$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$; при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 1,2$ комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 432,6$ балла.

При частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^0C$ максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 705,6$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{орг} = 532$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ и $L/D = 1,2$.

При частоте вращения шнека $\omega_3 = 180$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^0C$ максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 572$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{орг} = 360,4$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 1,2$; при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 432,6$ балла.

Анализ рисунка 4.7 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^0C$ наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 705,6$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.8 видно, что комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру до $L/D = 0,8$, при дальнейшем увеличении значения L/D от 0,8 до 1,2, комплексный показатель органолептических свойств снижается.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 609,5$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{орг} = 435,9$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ и $L/D = 1,2$

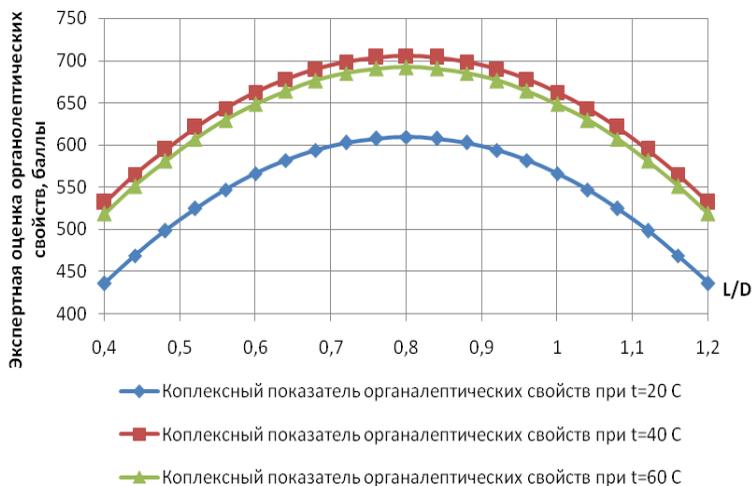


Рисунок 4.8 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$

При температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 705,6$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{орг} = 532$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ и $L/D = 1,2$.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 692$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{орг} = 518$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ и $L/D = 1,2$,

Анализ рисунка 4.8 показал, что при частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 705,6$ баллов достигает при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.9 видно, что комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении частоты вращения шнека до $\omega = 120 \text{ об/мин}$, при дальнейшем увеличении значения ω от 120 об/мин до 180 об/мин, комплексный показатель органолептических свойств снижается.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 534,2$ балла при частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$; минимальное значение $K_{орг} = 360,4$ баллов при частоте вращения шнека $\omega = 60 \text{ об/мин}$; при частоте вращения шнека

$\omega = 180$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств составляет $K_{орг} = 432,6$ балла.

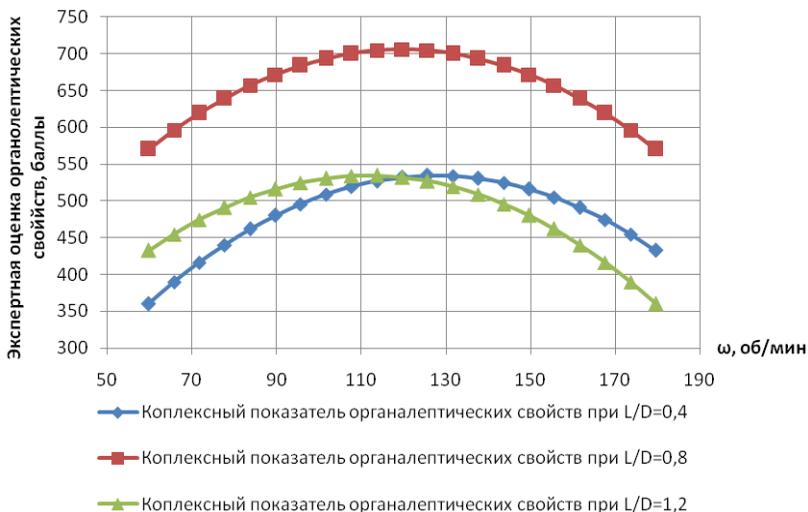


Рисунок 4.9 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega, об/мин \leq 180$), при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$, $L/D_3 = 1,2$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_2 = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 705,6$ баллов при частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин; минимальное значение $K_{орг} = 570,1$ баллов при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин и $\omega = 180$ об/мин.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_3 = 1,2$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C максимальное значение комплексного показателя органолептических свойств составляет $K_{орг} = 534,2$ балла при частоте вращения шнека

$\omega = 120$ об/мин; минимальное значение $K_{орг} = 360,4$ балла при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин; при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 432,6$ балла.

Анализ рисунка 4.9 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 705,6$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L / D = 0,8$.

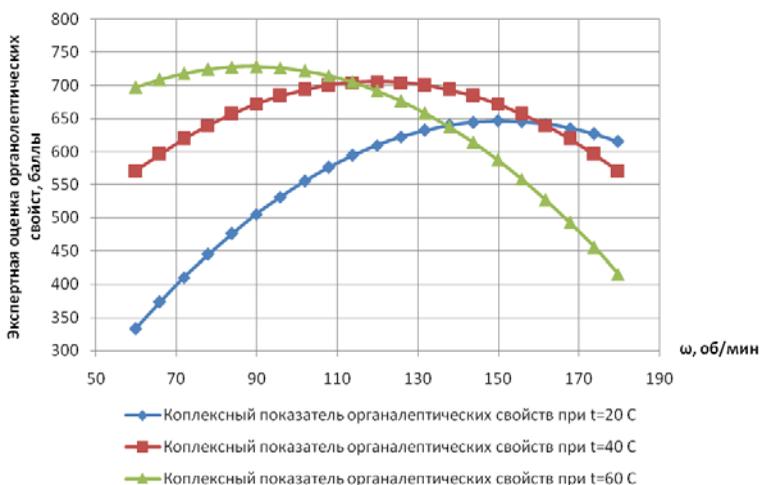


Рисунок 4.10 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega, об/мин \leq 180$), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °C, $t_2 = 40$ °C, $t_3 = 60$ °C и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L / D = 0,8$

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.10 видно, что при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °C и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L / D = 0,8$ ком-

плексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении частоты вращения шнека от $\omega = 60$ об/мин до $\omega = 150$ об/мин, при дальнейшем увеличении значения ω от 150 об/мин до 180 об/мин, комплексный показатель органолептических свойств снижается.

Так, при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °C и частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта составляет $K_{орг} = 333,2$ балла; при частоте вращения шнека $\omega = 150$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается до $K_{орг} = 646,1$ баллов; а при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта снижается до $K_{орг} = 614,9$ баллов.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40$ °C с увеличением частоты вращения шнека от $\omega = 60$ об/мин до $\omega = 120$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается от $K_{орг} = 570,1$ до $K_{орг} = 705,6$ баллов; при дальнейшем увеличении частоты вращения шнека до $\omega = 180$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта вновь снижается до значения $K_{орг} = 570,1$ баллов.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_3 = 60$ °C с увеличением частоты вращения шнека от $\omega = 60$ об/мин до $\omega = 90$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается от $K_{орг} = 697,4$ до $K_{орг} = 728,6$ баллов; при дальнейшем увеличении частоты вращения шнека до $\omega = 180$ об/мин комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта снижается до значения $K_{орг} = 415,7$ баллов.

Анализ рисунка 4.10 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 728,6$ бал-

лов достигает при частоте вращения шнека $\omega = 90$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t_3 = 60$ °C.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.11 видно, что при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °C до $t = 60$ °C.

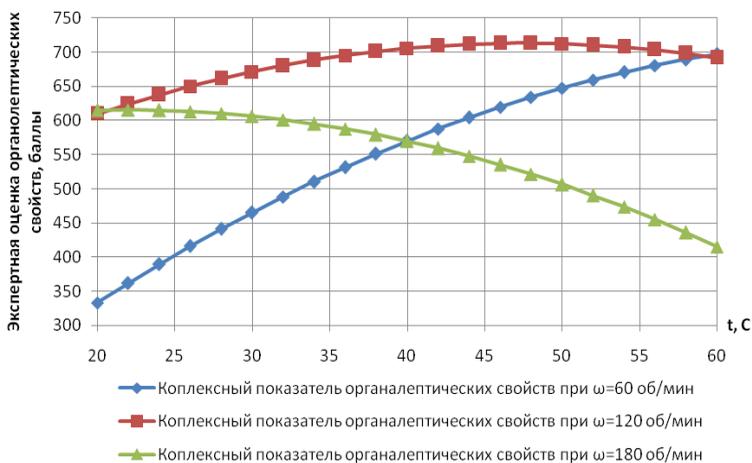


Рисунок 4.11 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от температуры сырья на входе в экструдер ($20 \leq t, ^\circ C \leq 60$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

Так, при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$ °C комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта составляет $K_{орз} = 333,2$ балла; а при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60$ °C ком-

плексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается до $K_{орг} = 697,4$ баллов.

При частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °C до $t = 45$ °C комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается от $K_{орг} = 609,5$ до $K_{орг} = 713,3$ баллов; при дальнейшем увеличении температуры сырья на входе в экструдер до $t = 60$ °C комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта вновь снижается до значения $K_{орг} = 692$ балла.

При частоте вращения шнека $\omega_3 = 180$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °C до $t = 60$ °C комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта снижается от $K_{орг} = 615$ до $K_{орг} = 415,7$ баллов.

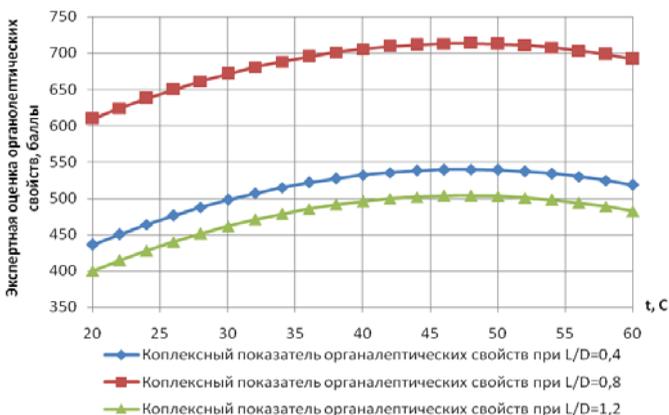


Рисунок 4.12 – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от температуры сырья на входе в экструдер ($20 \leq t, ^\circ C \leq 60$), при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$, $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин

Анализ рисунка 4.11 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 713,3$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.12 видно, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$ и $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$, при дальнейшем увеличении температуры сырья на входе в экструдер до $t = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта снижается.

Так, при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается от $K_{орг} = 487,5$ до $K_{орг} = 539,7$ баллов, а при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ снижается до $K_{орг} = 518,4$ баллов.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_2 = 0,8$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается от $K_{орг} = 661$ до $K_{орг} = 713,3$ баллов, а при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ снижается до $K_{орг} = 692$ баллов.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта с уве-

личением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °C до $t = 45$ °C увеличивается от $K_{орг} = 451,4$ до $K_{орг} = 503,6$ баллов, а при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 45$ °C до $t = 60$ °C снижается до $K_{орг} = 482,3$ баллов.

Анализ рисунка 4.12 показал, что при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин наибольшее значение комплексный показатель органолептических свойств $K_{орг} = 713,3$ баллов достигает при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_2 = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 45$ °C.

Таким образом, анализ зависимости комплексного показателя органолептических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала показал, что наибольшее значение $K_{орг} = 728,6$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega = 90$ об/мин, температуре сырья на входе в экструдер $t = 60$ °C и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

Графики зависимости комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала представлены на рисунках 4.13 – 4.18.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.13 видно, что комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру до $L/D = 0,8$, при дальнейшем увеличении значения L/D от 0,8 до 1,2, комплексный показатель физико-химических свойств снижается.

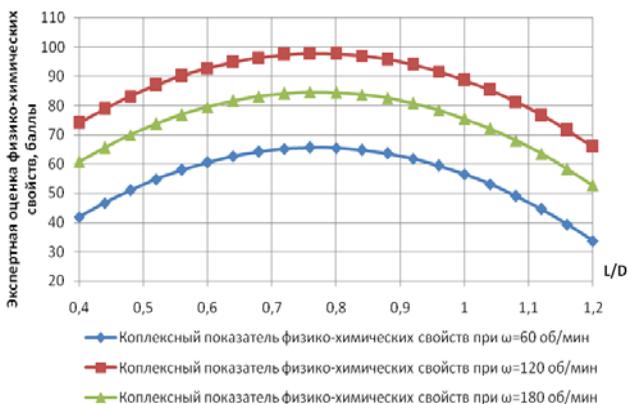


Рисунок 4.13 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60 \text{ об/мин}$, $\omega_2 = 120 \text{ об/мин}$, $\omega_3 = 180 \text{ об/мин}$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

При частоте вращения шнека $\omega_1 = 60 \text{ об/мин}$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{\phi.-x.} = 65,6$ баллов, при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{\phi.-x.} = 33,7$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 1,2$; при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$, комплексный показатель физико-химических свойств $K_{\phi.-x.} = 41,8$ балла.

При частоте вращения шнека $\omega_2 = 120 \text{ об/мин}$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{\phi.-x.} = 97,8$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{\phi.-x.} = 65,8$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 1,2$; при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру

$L/D = 0,4$ комплексный показатель физико-химических свойств составляет $K_{ф.-х.} = 74$ балла.

При частоте вращения шнека $\omega_3 = 180$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °С максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{ф.-х.} = 84,6$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{ф.-х.} = 52,6$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 1,2$; при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 60,8$ баллов.

Анализ рисунка 4.13 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °С наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 97,8$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

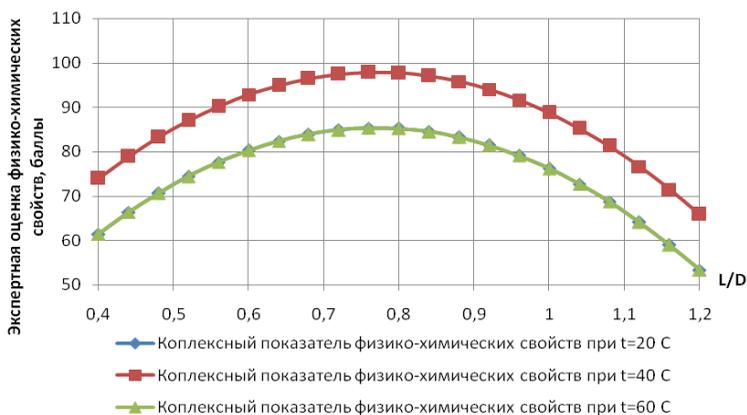


Рисунок 4.14 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °С, $t_2 = 40$ °С, $t_3 = 60$ °С и частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.14 видно, что комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру до $L/D = 0,8$, при дальнейшем увеличении значения L/D от 0,8 до 1,2, комплексный показатель физико-химических свойств снижается.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{\phi.-x.} = 85,3$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{\phi.-x.} = 53,3$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 1,2$; при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ комплексный показатель физико-химических свойств $K_{\phi.-x.} = 61,5$ балл.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{\phi.-x.} = 94$ балла при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$; минимальное значение $K_{\phi.-x.} = 65,8$ баллов при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 1,2$; при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$ комплексный показатель физико-химических свойств $K_{\phi.-x.} = 74$ балла.

Анализ рисунка 4.14 показал, что при частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{\phi.-x.} = 94$ балла достигает при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.15 видно, что комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении частоты вращения шнека до

$\omega = 130$ об/мин, при дальнейшем увеличении значения ω от 130 об/мин до 180 об/мин, комплексный показатель физико-химических свойств снижается.

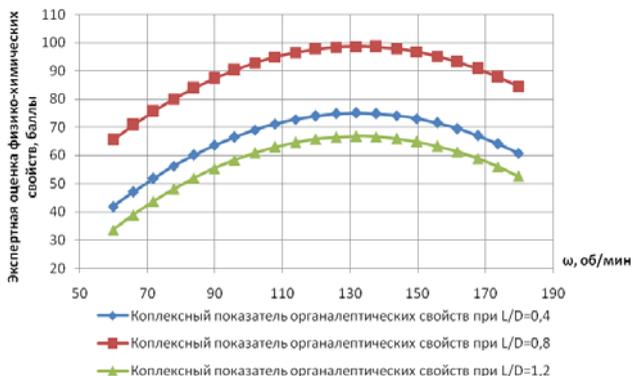


Рисунок 4.15 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega, \text{об/мин} \leq 180$), при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$, $L/D_3 = 1,2$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{ф.-х.} = 75$ баллов при частоте вращения шнека $\omega = 130$ об/мин; минимальное значение $K_{ф.-х.} = 41,8$ балл при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин; при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств составляет $K_{ф.-х.} = 60$ баллов.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_2 = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{ф.-х.} = 98,7$ баллов при частоте вращения шнека

$\omega = 130$ об/мин; минимальное значение $K_{ф.-х.} = 65,5$ баллов при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин; при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 84,5$ балла.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_3 = 1,2$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °С максимальное значение комплексного показателя физико-химических свойств составляет $K_{ф.-х.} = 66,8$ баллов при частоте вращения шнека $\omega = 130$ об/мин; минимальное значение $K_{ф.-х.} = 33,7$ балла при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин; при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 52,6$ балла.

Анализ рисунка 4.15 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °С наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 98,7$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega_2 = 130$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.16 видно, что при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °С и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении частоты вращения шнека от $\omega = 60$ об/мин до $\omega = 145$ об/мин, при дальнейшем увеличении значения ω от 145 об/мин до 180 об/мин, комплексный показатель физико-химических свойств снижается.

Так, при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °С и частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта составляет $K_{ф.-х.} = 45$ баллов; при частоте вращения шнека $\omega = 150$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается до $K_{ф.-х.} = 88,5$ баллов; а при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин

комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта снижается до $K_{\phi.-x.} = 79,8$ баллов.

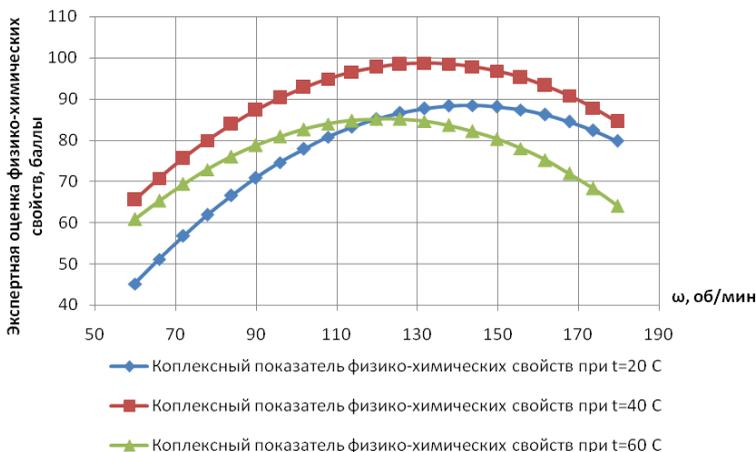


Рисунок 4.16 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega, об/мин \leq 180$), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_3 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

При температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ с увеличением частоты вращения шнека от $\omega = 60\text{ об/мин}$ до $\omega = 130\text{ об/мин}$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается от $K_{\phi.-x.} = 65,5$ до $K_{\phi.-x.} = 98,7$ баллов; при дальнейшем увеличении частоты вращения шнека до $\omega = 180\text{ об/мин}$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта вновь снижается до значения $K_{\phi.-x.} = 84,5$ баллов.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_3 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ с увеличением частоты вращения шнека от $\omega = 60\text{ об/мин}$ до $\omega = 120\text{ об/мин}$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается от $K_{\phi.-x.} = 60,9$ до $K_{\phi.-x.} = 85,2$ баллов; при даль-

нейшем увеличении частоты вращения шнека до $\omega = 180$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта снижается до значения $K_{ф.-х.} = 64$ баллов.

Анализ рисунка 4.16 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 98,7$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega = 130$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40$ °C.

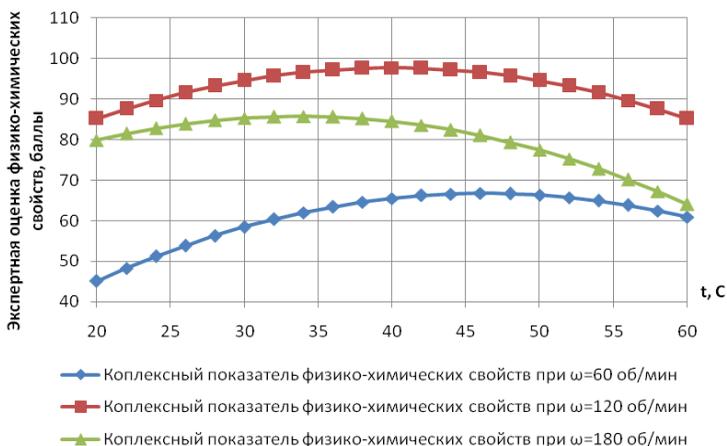


Рисунок 4.17 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от температуры сырья на входе в экструдер ($20 \leq t, ^\circ C \leq 60$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.17 видно, что при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °C до $t = 45$ °C увеличивается от $K_{ф.-х.} = 45$ до $K_{ф.-х.} = 66,6$ баллов; при

дальнейшем увеличении температуры сырья на входе в экструдер до $t = 60$ °С комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта снижается до значения $K_{ф.-х.} = 60,8$ баллов.

При частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °С до $t = 40$ °С комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается от $K_{ф.-х.} = 85,2$ до $K_{ф.-х.} = 97,7$ баллов; при дальнейшем увеличении температуры сырья на входе в экструдер до $t = 60$ °С комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта вновь снижается до значения $K_{ф.-х.} = 85,2$ баллов.

При частоте вращения шнека $\omega_3 = 180$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °С до $t = 35$ °С комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта снижается от $K_{ф.-х.} = 79,8$ до $K_{ф.-х.} = 85,7$ баллов; при дальнейшем увеличении температуры сырья на входе в экструдер до $t = 60$ °С комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта снижается до значения $K_{ф.-х.} = 64$ баллов.

Анализ рисунка 4.17 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 97,7$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °С.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.18 видно, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$ и $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта увеличивается, при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °С до $t = 40$ °С, при дальнейшем увеличении температуры сырья на входе в экструдер до $t = 60$ °С комплекс-

ный показатель физико-химических свойств кормового продукта снижается.

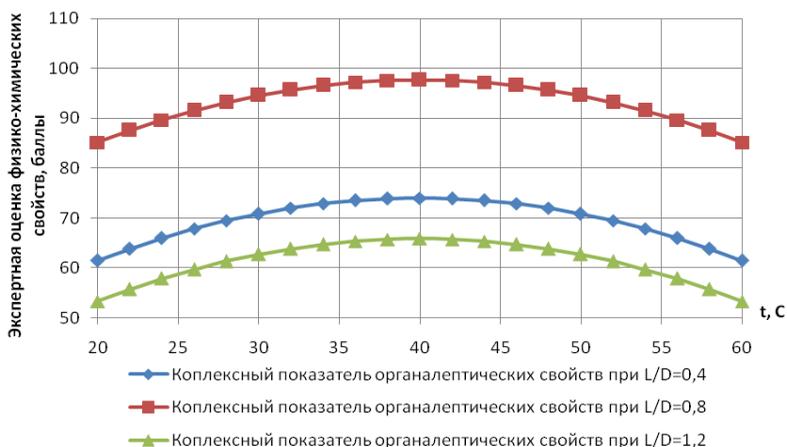


Рисунок 4.18 – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от температуры сырья на входе в экструдер ($20 \leq t, ^\circ C \leq 60$), при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$, $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$

Так, при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20 \text{ }^\circ C$ до $t = 40 \text{ }^\circ C$ увеличивается от $K_{\phi.-x.} = 61,5$ до $K_{\phi.-x.} = 74$ баллов, а при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 40 \text{ }^\circ C$ до $t = 60 \text{ }^\circ C$ вновь снижается до $K_{\phi.-x.} = 61,5$ балла.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_2 = 0,8$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20 \text{ }^\circ C$ до $t = 40 \text{ }^\circ C$ увеличивается от $K_{\phi.-x.} = 85,2$ до $K_{\phi.-x.} = 97,7$ баллов, а при

увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 40$ °C до $t = 60$ °C вновь снижается до $K_{ф.-х.} = 85,2$ баллов.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °C до $t = 40$ °C увеличивается от $K_{ф.-х.} = 53,3$ до $K_{ф.-х.} = 65,8$ баллов, а при увеличении температуры сырья на входе в экструдер от $t = 40$ °C до $t = 60$ °C вновь снижается до $K_{ф.-х.} = 53,3$ баллов.

Анализ рисунка 4.18 показал, что при частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин наибольшее значение комплексный показатель физико-химических свойств $K_{ф.-х.} = 97,7$ баллов достигает при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_2 = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C.

Таким образом, анализ зависимости комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала показал, что наибольшее значение $K_{ф.-х.} = 98,7$ баллов достигает при частоте вращения шнека $\omega = 130$ об/мин, температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

Графики зависимости удельных затрат энергии от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала представлены на рисунках 4.19 – 4.24.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.19 видно, что при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру от $L/D = 0,4$ до $L/D = 1,2$, удельные затраты энергии увеличиваются от $УЭЗ = 27,6$ Вт/кг до $УЭЗ = 29,6$ Вт/кг. При частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру от

$L/D = 0,4$ до $L/D = 1,2$ величина удельных затрат энергии не изменяется (является постоянной) и составляет $УЭЗ = 30,5 \text{ Вт/кг}$. При частоте вращения шнека $\omega_3 = 180 \text{ об/мин}$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^0\text{C}$ при увеличении отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру от $L/D = 0,4$ до $L/D = 1,2$ удельные затраты энергии снижаются от $УЭЗ = 31 \text{ Вт/кг}$ до $УЭЗ = 29 \text{ Вт/кг}$.

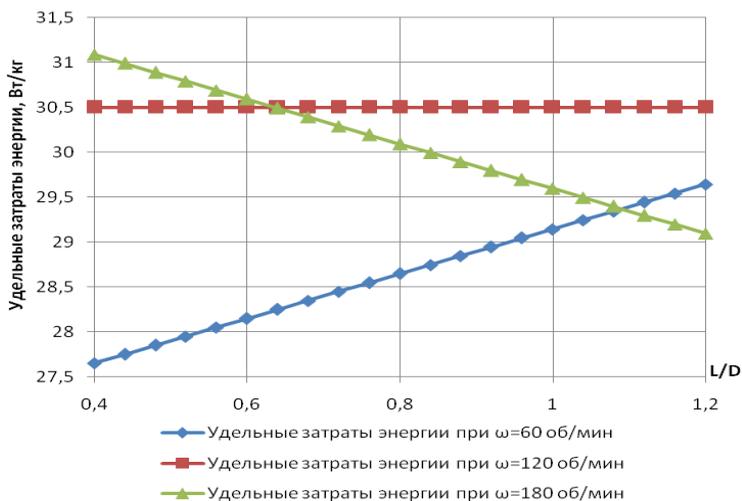


Рисунок 4.19 – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60 \text{ об/мин}$, $\omega_2 = 120 \text{ об/мин}$, $\omega_3 = 180 \text{ об/мин}$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^0\text{C}$

Анализ рисунка 4.19 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^0\text{C}$ наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 27,6 \text{ Вт/кг}$ при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60 \text{ об/мин}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,4$.

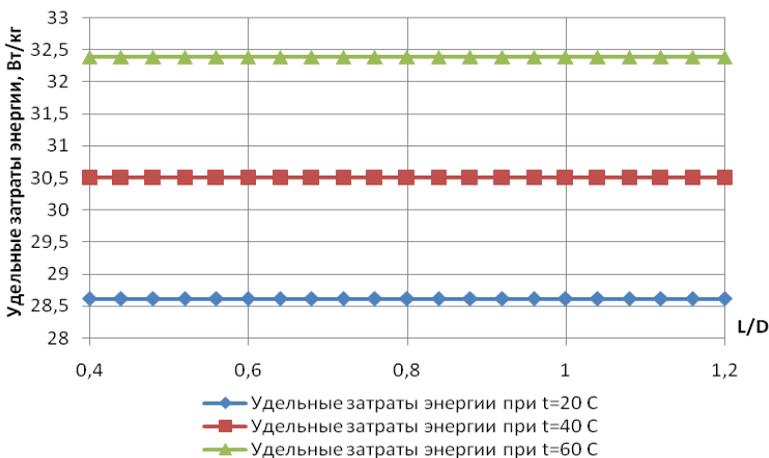


Рисунок 4.20 – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру ($0,4 \leq L/D \leq 1,2$), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.20 видно, что при частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ и температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, с увеличением отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру от $L/D = 0,4$ до $L/D = 1,2$ величина удельных затрат энергии не изменяется (остается постоянной). Так, при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $0,4 \leq L/D \leq 1,2$, удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 28,6 \text{ Вт/кг}$. При температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $0,4 \leq L/D \leq 1,2$, удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 30,5 \text{ Вт/кг}$. При температуре сырья на входе в экструдер $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружно-

му диаметру $0,4 \leq L/D \leq 1,2$, удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 32,4 \text{ Вт/кг}$.

Анализ рисунка 4.20 показал, что при частоте вращения шнека $\omega = 120 \text{ об/мин}$ наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 28,6 \text{ Вт/кг}$ при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и всех значениях отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру от $L/D = 0,4$ до $L/D = 1,2$.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.21 видно, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 31,2 \text{ Вт/кг}$ при частоте вращения шнека $\omega = 170 \text{ об/мин}$; минимальное значение $УЭЗ = 27,6 \text{ Вт/кг}$ при частоте вращения шнека $\omega = 60 \text{ об/мин}$; при частоте вращения шнека $\omega = 180 \text{ об/мин}$ удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 31 \text{ Вт/кг}$.

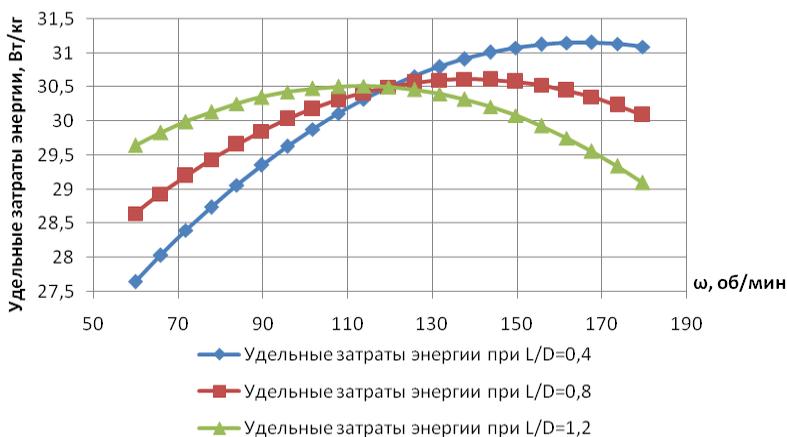


Рисунок 4.21 – Зависимость удельных затрат энергии от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega, \text{ об/мин} \leq 180$), при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$, $L/D_3 = 1,2$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_2 = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C максимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 30,6$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 140$ об/мин; минимальное значение $УЭЗ = 28,6$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин; при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 30$ Вт/кг.

При отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_3 = 1,2$ и температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C максимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 30,5$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 110$ об/мин; минимальное значение $УЭЗ = 29,1$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин; при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 29,6$ Вт/кг.

Анализ рисунка 4.21 показал, что при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ °C наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 27,6$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.22 видно, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ и температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °C, $t_2 = 40$ °C и $t_3 = 60$ °C, с увеличением частоты вращения шнека от $\omega = 60$ об/мин до $\omega = 140$ об/мин удельные затраты энергии возрастают, при дальнейшем увеличении частоты вращения шнека до $\omega = 180$ об/мин, величина удельных затрат энергии снижается.

Так, при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °C и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ максимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 28,7$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 140$ об/мин; минимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 27$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин; при частоте вращения шнека

$\omega = 180 \text{ об/мин}$ удельные затраты энергии составляют
 $УЭЗ = 28,2 \text{ Вт/кг}$.

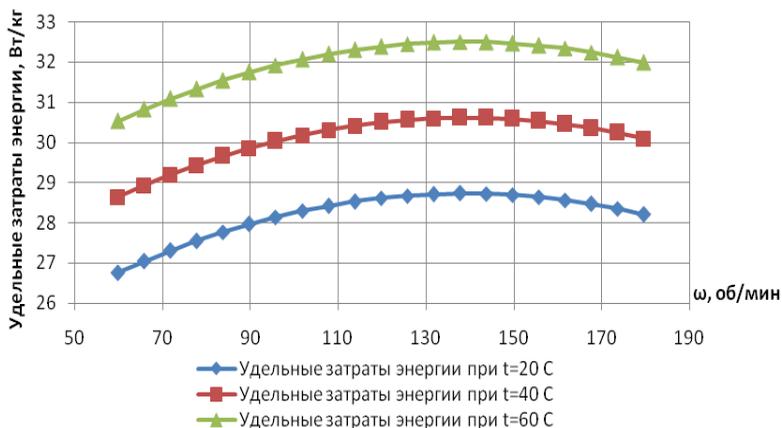


Рисунок 4.22 – Зависимость удельных затрат энергии от частоты вращения шнека ($60 \leq \omega, \text{ об/мин} \leq 180$), при температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 40^\circ\text{C}$, $t_3 = 60^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

При температуре сырья на входе в экструдер $t_2 = 40^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ максимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 30,6 \text{ Вт/кг}$ при частоте вращения шнека $\omega = 140 \text{ об/мин}$; минимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 28,9 \text{ Вт/кг}$ при частоте вращения шнека $\omega = 60 \text{ об/мин}$; при частоте вращения шнека $\omega = 180 \text{ об/мин}$ удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 30 \text{ Вт/кг}$.

При температуре сырья на входе в экструдер $t_3 = 60^\circ\text{C}$ и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ максимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 32,5 \text{ Вт/кг}$ при частоте вращения шнека $\omega = 140 \text{ об/мин}$; минимальное значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 30,8 \text{ Вт/кг}$ при частоте вращения шнека

$\omega = 60$ об/мин; при частоте вращения шнека $\omega = 180$ об/мин удельные затраты энергии составляют $УЭЗ = 31,9$ Вт/кг.

Анализ рисунка 4.22 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 27$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t_1 = 20$ °С.

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.23 видно, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ и частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин и $\omega_3 = 180$ об/мин с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °С до $t = 60$ °С удельные затраты энергии возрастают.

Так, при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °С до $t = 60$ °С удельные затраты энергии возрастают от $УЭЗ = 26,7$ Вт/кг до $УЭЗ = 30,5$ Вт/кг.

При частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °С до $t = 60$ °С удельные затраты энергии возрастают от $УЭЗ = 28,6$ Вт/кг до $УЭЗ = 32,4$ Вт/кг. При частоте вращения шнека $\omega_3 = 180$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °С до $t = 60$ °С удельные затраты энергии возрастают от $УЭЗ = 28,2$ Вт/кг до $УЭЗ = 31,9$ Вт/кг.

Анализ рисунка 4.23 показал, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$ наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 26,7$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин и температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$ °С.

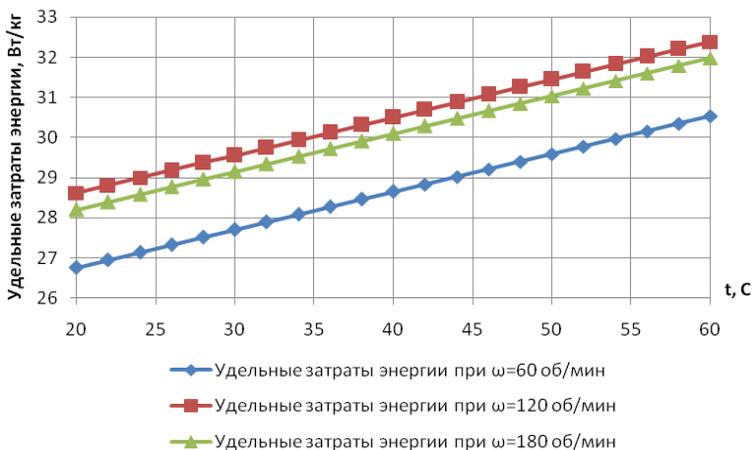


Рисунок 4.23 – Зависимость удельных затрат энергии от температуры сырья на входе в экструдер ($20 \leq t, ^\circ C \leq 60$), при частоте вращения шнека $\omega_1 = 60$ об/мин, $\omega_2 = 120$ об/мин, $\omega_3 = 180$ об/мин и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$

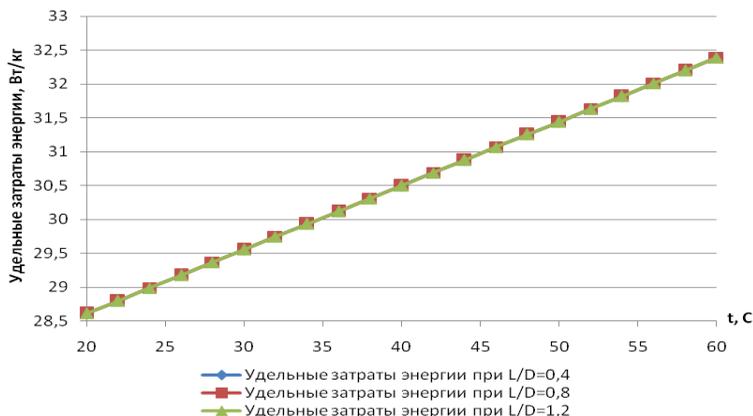


Рисунок 4.24 – Зависимость удельных затрат энергии от температуры сырья на входе в экструдер ($20 \leq t, ^\circ C \leq 60$), при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$, $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 4.24 видно, что при отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D_1 = 0,4$, $L/D_2 = 0,8$ и $L/D_3 = 1,2$ и частоте вращения шнека $\omega = 120$ об/мин с увеличением температуры сырья на входе в экструдер от $t = 20$ °C до $t = 60$ °C удельные затраты энергии возрастают от $УЭЗ = 28,6$ Вт/кг до $УЭЗ = 32,4$ Вт/кг.

Анализ рисунка 4.24 показывает, что при частоте вращения шнека $\omega_2 = 120$ об/мин наименьшее значение удельных затрат энергии $УЭЗ = 28,6$ Вт/кг при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$ °C и не зависит от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру.

Таким образом, анализ зависимости удельных затрат энергии от параметров технологического процесса и перерабатываемого материала показал, что наименьшее значение $УЭЗ = 26,7$ Вт/кг при частоте вращения шнека $\omega = 60$ об/мин, температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$ °C и отношении шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру $L/D = 0,8$.

На основании представленных результатов однофакторных экспериментов сделан вывод, что органолептические и физико-химические свойства кормового продукта и энергоёмкость процесса экструзии достигают наилучших показателей при весьма различных параметрах технологического процесса и перерабатываемого материала. В связи с чем, необходимо провести графоаналитическую оптимизацию процесса экструзии кормовых продуктов с целью определения области оптимальных значений и последующего наложения ограничений на разработанную математическую модель для получения высококачественных кормовых продуктов при минимальных затратах энергии.

Для проведения оптимизации был составлен и реализован трехфакторный эксперимент, по результатам которого были получены уравнения регрессии. В таблицах 4.7 – 4.10 представлена шкала органолептической оценки качества экструдированных кормовых продуктов «обработка результатов экспертной оценки кормового продукта полученного в ходе трехфакторного эксперимента ПФЭ 2³».

Таблица 4.7 – Результаты ранжирования внешнего вида кормового продукта
(коэффициент значимости $K=3$)

№ образца	Эксперт					Сумма рангов, C_p	$C_p \cdot K$
	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 проведенного ранжирования внешнего вида кормового продукта показали, что согласно экспертной оценки наибольшее количество баллов получил образец № 7, которое с учетом коэффициента значимости ($K=3$) составило 204 балла.

Таблица 4.8 – Результаты ранжирования аромата кормового продукта
(коэффициент значимости $K=5$)

№ образца	Эксперт					Сумма рангов, C_p	$C_p \cdot K$
	1-ый	2-ой	3-й	4-ый	5-ый		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	15	13	11	14	15	68	340
2	5	6	7	6	5	29	145

Продолжение таблицы 4.8

1	2	3	4	5	6	7	8
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

Результаты проведенного ранжирования аромата кормового продукта кормового продукта показали, что согласно экспертной оценки наибольшее количество баллов получили образцы № 3 и № 5, которое с учетом коэффициента значимости ($K=5$) составило 345 баллов.

Таблица 4.9 – Результаты ранжирования цвета кормового продукта
(коэффициент значимости для вкуса $K=3$)

№ образца	Эксперт					Сумма рангов, C_p	$C_p \cdot K$
	1-ый	2-ой	3-й	4-ый	5-ый		
1	2	3	4	5	6	7	8
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

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8
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

Результаты проведенного ранжирования цвета кормового продукта кормового продукта показали, что согласно экспертной оценки наибольшее количество баллов получил образец № 5, которое с учетом коэффициента значимости ($K=3$) составило 210 баллов.

Таблица 4.10 – Сумма результатов ранжирования внешнего вида, аромата и цвета кормовых продуктов (коэффициенты значимости $K=3$, $K=5$, $K=3$)

№ образца	Внешний вид <i>Ср · К</i>	Запах	Вкус	Итого
		<i>Ср · К</i>	<i>Ср · К</i>	Сумма <i>Ср · К</i>
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

Сумма результатов ранжирования внешнего вида, аромата и цвета кормовых продуктов (табл. 4.7) показала, что наибольшее количество баллов по трем показателям органолептических свойств получил образец под № 5, суммарное количество баллов составило 756.

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

– для определения комплексного показателя органолептических свойств экструдированного кормового продукта по результатам экспертной оценки:

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

– для определения комплексного показателя физико-химических свойств экструдированного кормового продукта:

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

– 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;

ω_3 – частота вращения шнека;

t – температура сырья на входе в экструдер

величины L/D , ω_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 ω_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 на основании приведенных выше уравнений регрессии. На рисунках 4.25 *a* – 4.25 *в* представлены плоскости зависимости экспертной оценки органолептических свойств от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру L/D и частоты вращения шнека ω (об/мин), при температуре продукта на входе в экструдер $t = 20$, $t = 40$ и $t = 60$ $^{\circ}\text{C}$.

При анализе поверхности отклика органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки (рис. 4.25 *a*), при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$ $^{\circ}\text{C}$ 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 ω_3 – 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 (рис. 4.25 *б*), при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40$ $^{\circ}\text{C}$ 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 ω_3 – от 96 до 144 об/мин (от -0,4 до 0,4 у. е.).

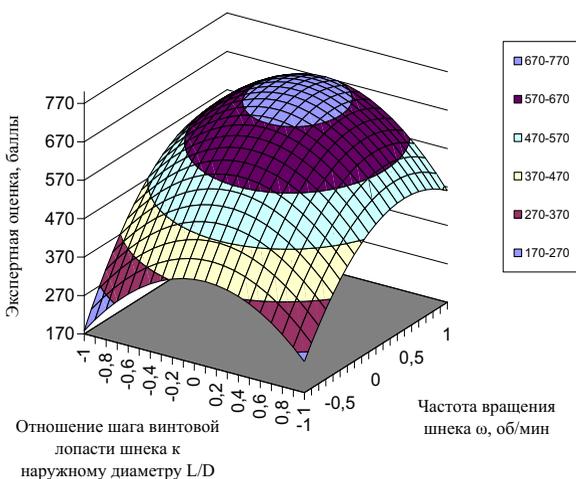


Рисунок 4.25 а – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

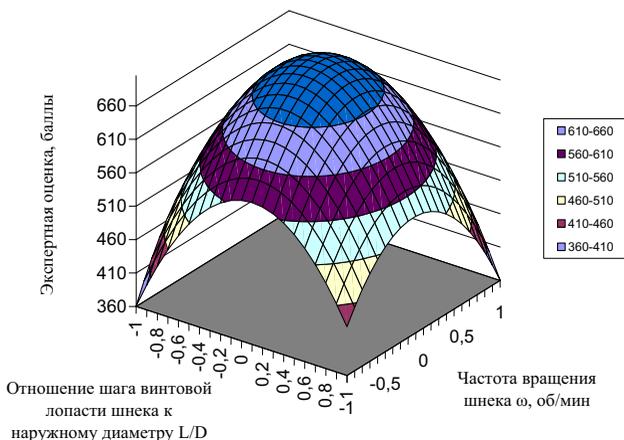


Рисунок 4.25 б – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

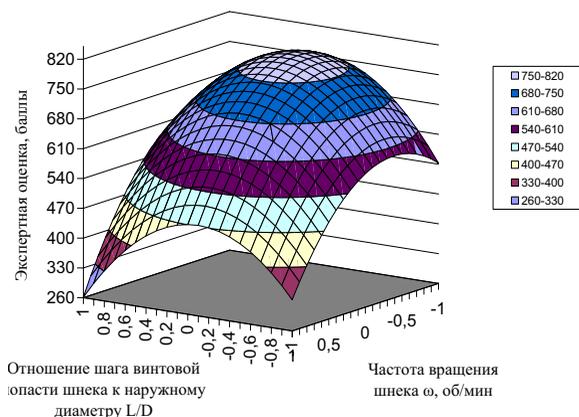


Рисунок 4.25 в – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60$ °С)

При анализе поверхности отклика органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки (рис. 4.25 в), 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 $\omega_{\text{Э}}$ – 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 $\omega_{\text{Э}}$ – 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.

На рисунках 4.26 а – 4.26 в представлены поверхности отклика зависимости комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наруж-

ному диаметру L/D и частоты вращения шнека ω , об/мин, при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$, $t = 40$ и $t = 60$ °С.

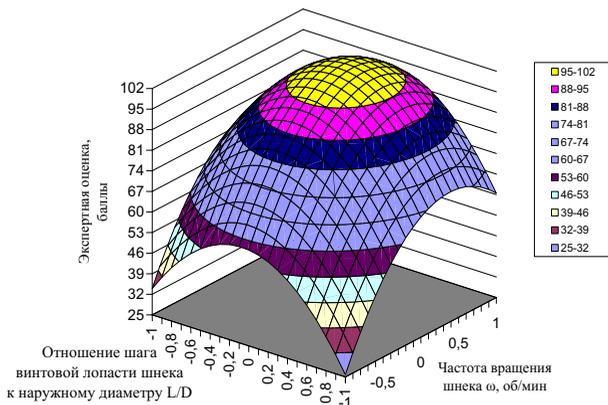


Рисунок 4.26 а – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$ °С)

При анализе поверхности отклика комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта (рис. 4.26 а) 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 ω_3 – от 120 до 162 об/мин (от 0 до 0,7 у. е.).

При анализе поверхности отклика комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта (4.26 б) 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 ω_3 – от 114 до 150 об/мин (от -0,1 до 0,5 у. е.).

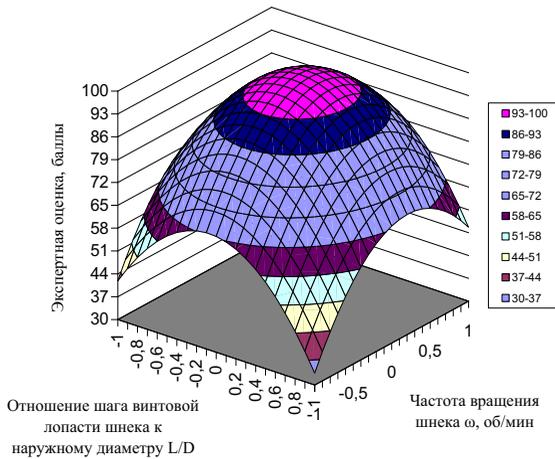


Рисунок 4.26 б – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^{\circ}\text{C}$)

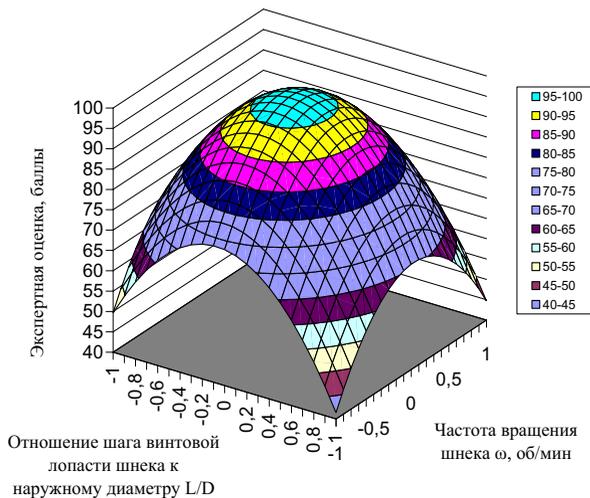


Рисунок 4.26 в – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60^{\circ}\text{C}$)

При анализе поверхности отклика комплексного показателя физико-химических свойств кормового продукта (4.26 в) 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 $\omega_{\text{Э}}$ – 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 $\omega_{\text{Э}}$ – 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 достигнуть комплексного показателя физико-химических свойств свыше 95 баллов.

На рисунках 4.27 а – 4.27 в представлены поверхности отклика зависимости удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру L/D и частоты вращения шнека $\omega_{\text{Э}}$, об/мин, при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20$, $t = 40$ и $t = 60$ °С.

При анализе поверхности отклика удельных затрат энергии (4.27 а) 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 $\omega_{\text{Э}}$ – от 60 до 63 об/мин (от -1 до -0,95 у. е.).

При анализе поверхности отклика удельных затрат энергии (4.27 б) 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 $\omega_{\text{Э}}$ – от 60 до 61,5 об/мин (от -1 до -0,97 у. е.).

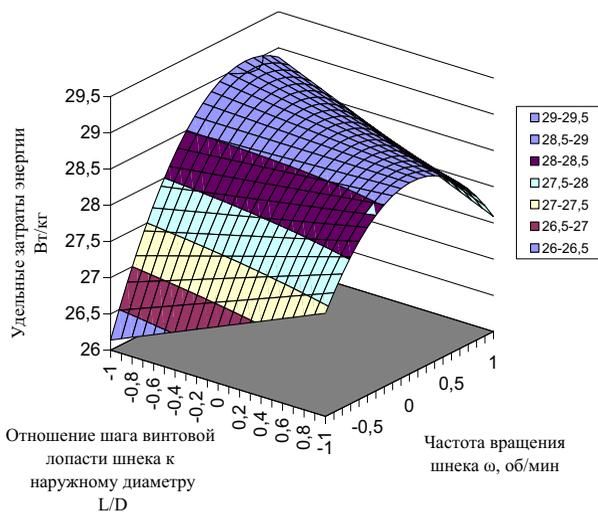


Рисунок 4.27 а – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^{\circ}\text{C}$)

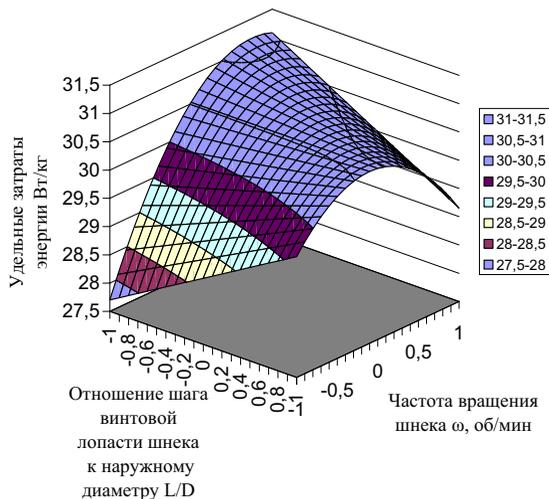


Рисунок 4.27 б – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^{\circ}\text{C}$)

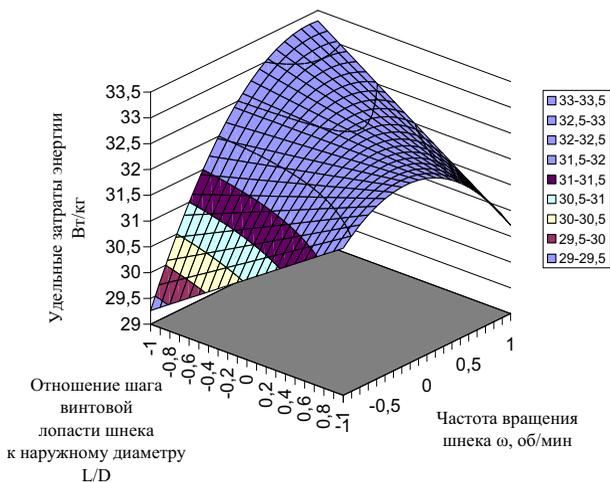


Рисунок 4.27 в – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60^{\circ}\text{C}$)

При анализе поверхности отклика удельных затрат энергии (рис. 4.27 в) при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60^{\circ}\text{C}$ 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 $\omega_{\text{Э}}$ – 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 $\omega_{\text{Э}}$ – от 60 до 63 об/мин (от -1 до -0,95 у. е.), при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^{\circ}\text{C}$. 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 на рисунках 4.28 – 4.30, при различных температурах. На рисунках 4.28 а – 4.28 в представлены горизонтальные проекции плоскостей отклика 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 $t = 20^{\circ}\text{C}$.

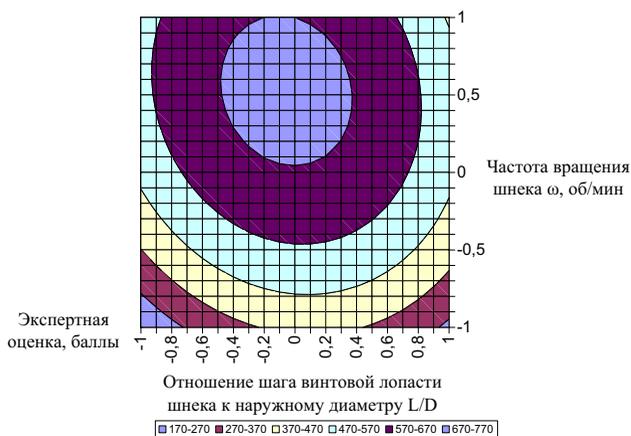


Рисунок 4.28 а – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^{\circ}\text{C}$)

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 $t = 20^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.28 а – 4.28 в) 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.

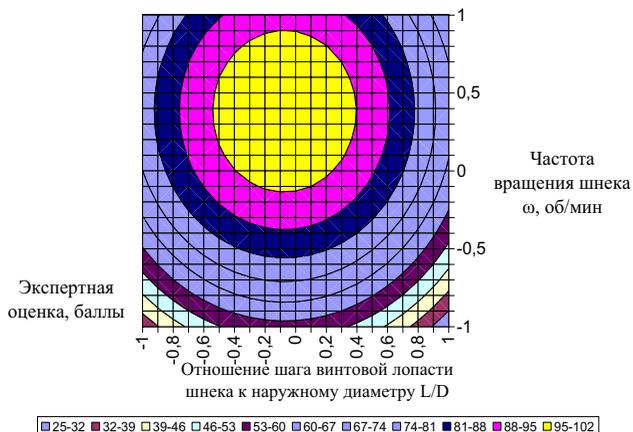


Рисунок 4.28 а – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^{\circ}\text{C}$)

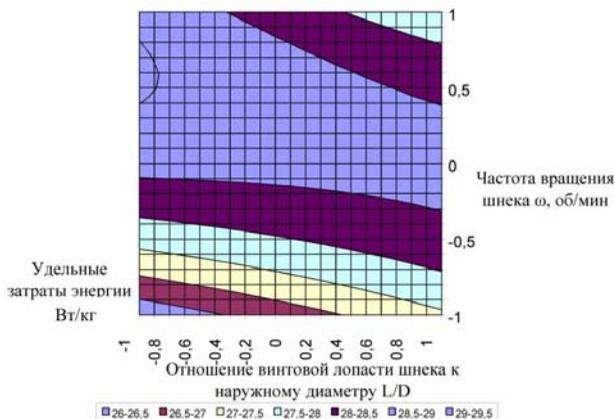


Рисунок 4.28 б – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 20^{\circ}\text{C}$)

На рисунках 4.29 *a* – 4.29 *в* представлены горизонтальные проекции плоскостей отклика 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 $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

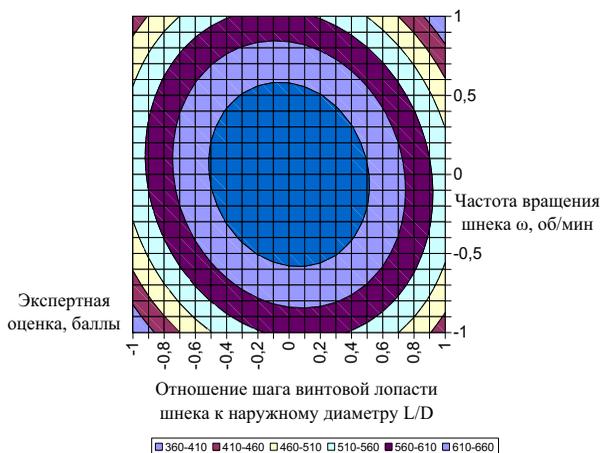


Рисунок 4.29 *a* – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

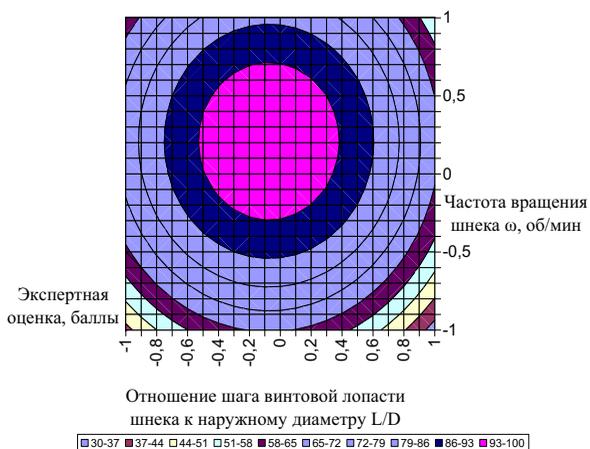


Рисунок 4.29 б – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^{\circ}\text{C}$)

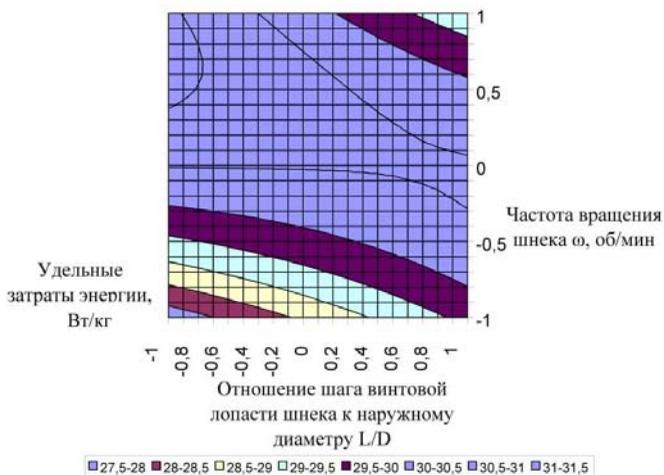


Рисунок 4.29 в – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 40^{\circ}\text{C}$)

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 $t = 40^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.29 *a* – 4.29 *в*) 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.

На рисунках 4.30 *a* – 4.30 *в* представлены горизонтальные проекции плоскостей отклика 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 $t = 60^{\circ}\text{C}$.

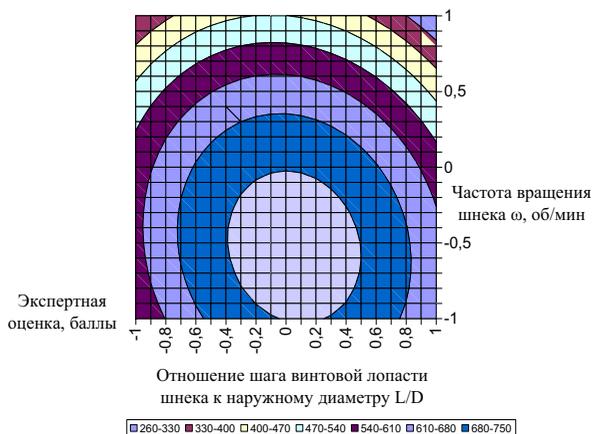


Рисунок 4.30 *a* – Зависимость органолептических свойств кормового продукта по результатам экспертной оценки от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60^{\circ}\text{C}$)

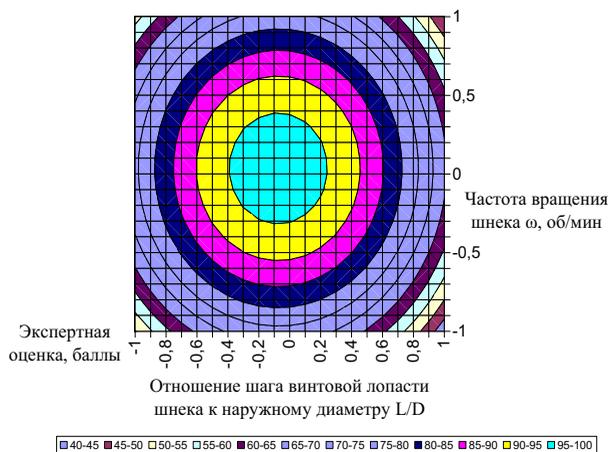


Рисунок 4.30 б – Зависимость физико-химических свойств кормового продукта от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60^{\circ}\text{C}$)

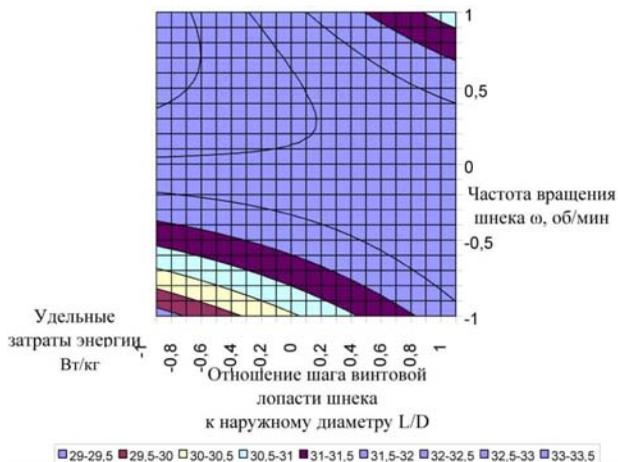


Рисунок 4.30 в – Зависимость удельных затрат энергии от отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру и частоты вращения шнека (при температуре сырья на входе в экструдер $t = 60^{\circ}\text{C}$)

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 (рис. 4.30 а – 4.30 в) 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 (от -0,08 до 0,02 в безразмерном выражении), частота вращения шнека от 171 об/мин до 174 об/мин (от 0,87 до 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 4.31.

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.

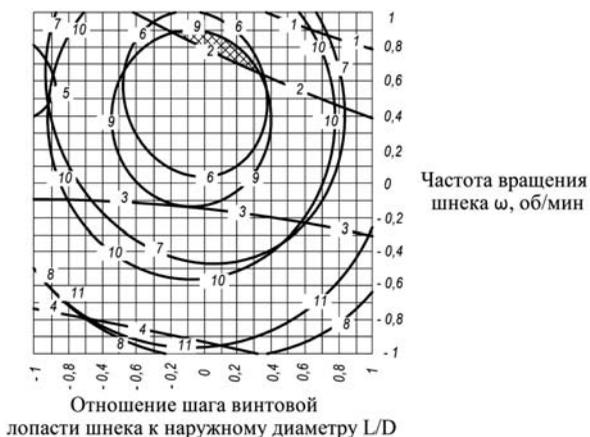


Рисунок 4.31 – Оптимальное сочетание поверхностей отклика для процесса экструдирования кормового продукта (область заштрихована): 1 – $УЗЭ=28,5$ Вт/кг; 2 – $УЗЭ=28,0$ Вт/кг; 3 – $УЗЭ=29,0$ Вт/кг; 4 – $УЗЭ=28,5$ Вт/кг; 5 – $УЗЭ=27,0$ Вт/кг; 6 – $К_{ОРГ}=670$ баллов; 7 – $К_{ОРГ}=570$ баллов; 8 – $К_{ОРГ}=370$ баллов; 9 – $К_{Ф-Х}=88$ баллов; 10 – $К_{Ф-Х}=74$ балла; 11 – $К_{Ф-Х}=67$ баллов ($УЗЭ$ – удельные затраты энергии; $К_{ОРГ}$ – комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта; $К_{Ф-Х}$ – комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта)

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 (рис. 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).

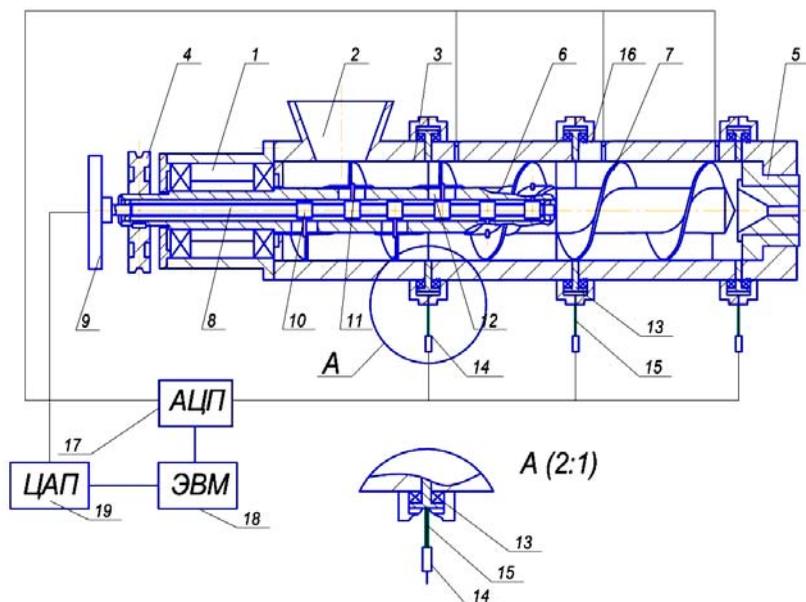


Рисунок 5.1 – Схема установки для производства экструдированных кормовых продуктов

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. Исполнитель-

ный элемент 9, приводит во вращение резьбовой вал 8. При вращении резьбового вала 8, происходит перемещение втулок 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.

Разработанная конструкция пресс-экструдера базируется на стандартных расчетах.

Технический расчет потребляемой мощности шнекового пресс-экструдера аналогичен расчету, приведенному в учебном издании А.Я. Соколова [90]. 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 $q_{сек} = \sum f_0 v \cdot 100$ – объем выпрессованных за 1 секунду изделий в $\text{см}^3 / \text{сек}$;

$\sum f_0$ – суммарная площадь живого сечения отверстий на матрице, см^2 ;

v – средняя скорость выпрессовывания изделий, $\text{м} / \text{сек}$;

P_M – давление у матрицы, кг/см²;

$\eta_{ш}$ – 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 ρ – плотность готового продукта, г/см³.

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

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

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%.

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_u , Вт	2,7	2,3
Q , кг/ч	350	410
УЭЗ, Вт/кг	27,7	20,2

5.2 Результаты производственных испытаний конструкции пресс-экструдера с изменяющимися непосредственно в процессе работы параметрами шнека

Контрольные испытания процесса производства экструдированных кормовых продуктов на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера 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.

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

Сравнительный анализ качественных показателей готового кормового продукта и удельных затрат энергии процесса экструдирования представлен на рисунке 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
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	$K_{\phi-x}$, балл	95	106
14	K_{opz} , балл	650	670

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.

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

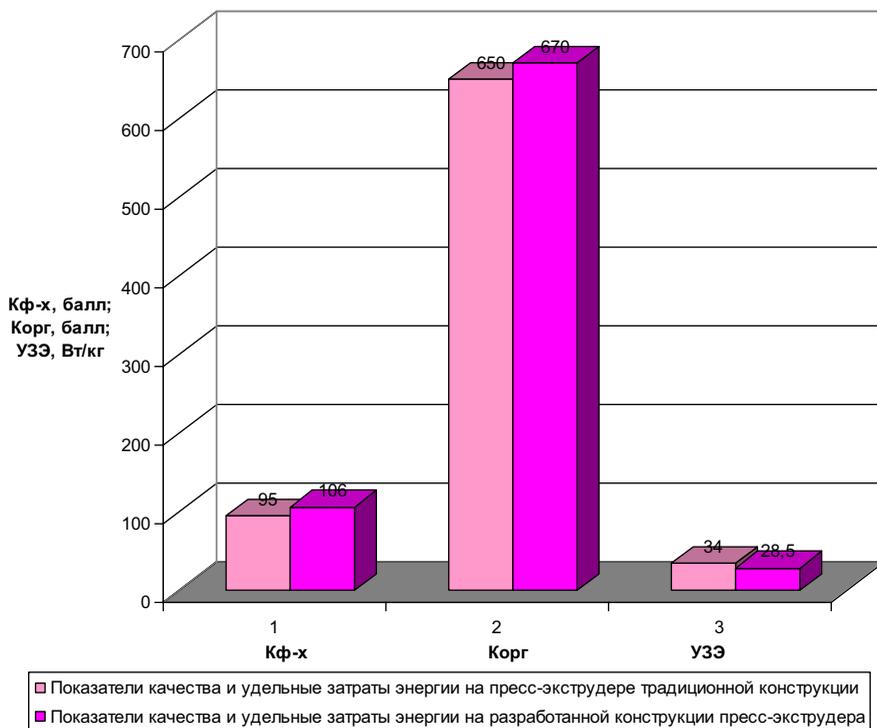


Рисунок 5.2 – Сравнительный анализ качественных показателей готового кормового продукта и удельных затрат энергии на проведение процессов экструдирования кормовых продуктов

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.

Анализ эффективности применения разработанной конструкции пресс-экструдера показывает, что за счет изменения отношения шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру можно повысить кри-

терий 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 Результаты исследования изменения питательной ценности зерновых кормов в процессе экструзионной обработки на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера

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 исследования изменения энергетической ценности зернового сырья в процессе экструзионной обработки на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера, было изучено изменение химического состава трех образцов: контрольный образец – исходная неэкструдированная зерновая смесь в составе: пшеница – 10 %, овёс – 19 %, ячмень – 70 %, соль поваренная – 1 %, I образец – кормовой продукт, экструдированный на стандартной конструкции пресс-экструдера и II образец – кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера по методике, приведенной в пункте 3.4.4. Результаты исследований представлены в таблице 5.3.

Результаты проведенных экспериментальных исследований 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.

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

Показатели	Химический состав		
	контрольный образец	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	0,94 ± 0,005	1,07 ± 0,006	1,11 ± 0,006
Концентрация обменной энергии, МДж/кг СВ	12,3	12,42	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 ± 10,81
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

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 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 % больше 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 4,5 % – 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 [113].

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 кон-

трольным; 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.

Определение содержания обменной энергии в сухом веществе кормовых продуктов показало, что за счет химических преобразований, произошедших в экструдированных кормовых продуктах, их обменная энергия увеличилась. Следует отметить, что кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, отличался большей концентрацией обменной энергии: во II образце концентрация обменной энергии выше на 0,28 МДж/кг СВ (2,2) % по сравнению с I образцом и – на 0,4 МДж/кг СВ (3,1 %) с контрольным образцом.

Таким образом, кормовой продукт, экструдированный на разработанной конструкции пресс-экструдера, обладает большей концентрацией обменной энергии на 0,28 МДж/кг СВ (2,2 %), большим содержанием кормовых единиц – 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.

Корма, скармливаемые подопытным животным, при любом химическом составе могут иметь разную перевариваемость питательных веществ, что, в конечном счете, и определяет их продуктивную ценность. Главным условием улучшения переваривающей способности пищеварительного тракта и повышения продуктивного действия кормов явля-

ется концентрация энергии и протеина в единице сухого вещества и непрерывность снабжения организма необходимыми питательными веществами [86, 87].

Исследования по оценке перевариваемости «in situ» на молодянке 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 – $57,17 \pm 1,3$ % ($P < 2,3$ %).

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

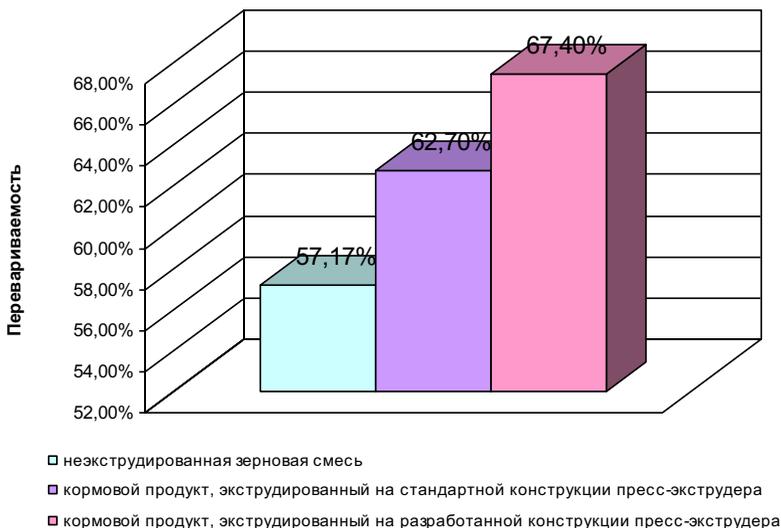


Рисунок 5.3 – Перевариваемость кормов в рубце молодянка крупного рогатого скота

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 %.

Является целесообразным провести исследования по изучению влияния кормового продукта, полученного на разработанной и стандартной конструкции пресс-экструдера на повышение мясной продуктивности крупного рогатого скота.

5.4 Результаты исследования влияния кормового продукта, полученного на разработанной конструкции пресс-экструдера, на мясную продуктивность крупного рогатого скота

Испытания кормовых продуктов экструдированных на стандартной и разработанной конструкции пресс-экструдера были проведены 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 (табл. 5.4).

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.

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
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

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

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

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.

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, в отличие от контроля. Следует отметить, что подопытные животные, получавшие в составе рациона кормовой продукт, экстрадированный 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, экстрадированный 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 (табл. 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 экстрадированными кормовыми продуктами, отразилась на обменных процессах в организме животных. Так, увеличение валовой энергии ра-

циона 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, а также питательная и энергетическая ценность кормов отразились на приросте живой массы подопытных животных (табл. 5.7).

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

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.

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 скормливания 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.

5.5 Определение экономической эффективности

5.5.1 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 [69].

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, необходимые затраты на изготовление пресс-экструдера ориентировочно 70 тыс. руб. (в ценах на 01.03.16 г.). Стоимость остального оборудования, из которого состоит линия, составит $I = 1500$ тыс. руб. (балансовая стоимость на 01.03.2016 г.). Расчет произведен в ценах на 01.03.2016 г.

Себестоимость продукции:

1) Расходы на сырье:

а) стандартная технология:

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

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

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

Соль: годовой расход:

$\Gamma^4_T = (\Gamma^1_T + \Gamma^2_T + \Gamma^3_T) \cdot 1/100 = (58,528 + 409,696 + 111,203) \cdot 1/100 = 5,8$ т.
стоимость 1 т соли – $C^4_T = 10$ тыс. руб. С учетом транспортно-заготовительных расходов (ТЗР=3%) годовая стоимость соли составит $З^4_T = \Gamma^4_T \cdot C^4_T \cdot (100 - TPЗ)/100 = 5,8 \cdot 10 \cdot (100 - 3)/100 = 56,2$ тыс. руб.

Всего расходы на сырье:

$З_T = З^1_T + З^2_T + З^3_T + З^4_T = 397,4 + 1987 + 431,46 + 56,2 = 2872,06$ тыс. руб. в год.

б) предлагаемая технология:

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

Ячменя: годовой расход – $\Gamma^2_{II} = D \cdot K^2_{II} = 236 \cdot 2016 = 475776$ кг = 475,776 т.; расходы на 1т – $C^2_{II} = 5$ тыс. руб. С учетом расходов на транс-

портно-заготовительные работы (ТЗР=3 %) годовая стоимость ячменя составит $З^2_{П} = \Gamma^2_{П} \cdot C^2_{П} \cdot (100 - TPЗ)/100 = 475,775 \cdot 5 \cdot (100 - 3)/100 = 2307,5$ тыс. руб.

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

Соль: годовой расход:

$\Gamma^4_{П} = (\Gamma^1_{П} + \Gamma^2_{П} + \Gamma^3_{П}) \cdot 1/100 = (67,968 + 475,776 + 129,139) \cdot 1/100 = 6,7$ т. стоимость 1 т соли – $C^4_{Т} = 10$ тыс. руб. С учетом транспортно-заготовительных расходов (ТЗР=3 %) годовая стоимость соли составит $З^4_{П} = \Gamma^4_{П} \cdot C^4_{П} \cdot (100 - TPЗ)/100 = 6,7 \cdot 10 \cdot (100 - 3)/100 = 65,3$ тыс. руб.

Всего расходы на сырье:

$З_{П} = З^1_{П} + З^2_{П} + З^3_{П} + З^4_{П} = 461,5 + 2307,5 + 501,06 + 65,3 = 3335,4$ 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 %) – $A_{Т.ОБ} = 180$ тыс. руб.

Амортизация производственного помещения – $A_{Т.П} = 120$ тыс. руб.

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

б) предлагаемая технология:

Затраты на оборудование $I_{П} = 1500 + 70 = 1570$ тыс. руб. Амортизация (12 %) – $A_{П.ОБ} = 188$ тыс. руб.

Амортизация производственного помещения – $A_{П,П} = 120$ тыс. руб.

Всего: $A_{П} = A_{П,П} + A_{П,ОБ} = 188 + 120 = 308$ 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:

$P_{B,Т} = D \cdot K_T \cdot P_B / 100 = 236 \cdot 2480 \cdot 300 / 100 = 1755845$ л = $175,584$ м³;
стоимость 1 м³ – 30 руб.

Затраты на воду за год составят $\Gamma_{B,Т} = 175,584 \cdot 30 / 1000 = 5,27$ 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:

$P_{B,Т} = D \cdot K_{П} \cdot P_B / 100 = 236 \cdot 2880 \cdot 300 / 100 = 2039040$ л = $203,904$ м³;
стоимость 1 м³ – 30 руб.

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

5) Затраты на электроэнергию

а) стандартная технология:

за год потребность в электроэнергии для производства экструдированных кормовых продуктов составит:

$$\Gamma_{Э,Т} = D \cdot 10,5 \cdot 8 = 236 \cdot 10,5 \cdot 8 = 19824 \text{ кВт.}$$

Стоимость 1 кВт электроэнергии – 2,5 руб.

Затраты на электроэнергию составят

$$\mathcal{E}_Т = 2,5 \cdot \Gamma_{Э,Т} = 2,5 \cdot 19824 = 49,56 \text{ тыс. руб. в год.}$$

б) предлагаемая технология:

за год потребность в электроэнергии для производства экструдированных кормовых продуктов составит:

$$\Gamma_{Э,П} = D \cdot 10 \cdot 8 = 236 \cdot 10 \cdot 8 = 18800 \text{ кВт.}$$

Стоимость 1 кВт электроэнергии – 2,5 руб.

Затраты на электроэнергию составят

$$\mathcal{E}_П = 2,5 \cdot \Gamma_{Э,П} = 2,5 \cdot 18800 = 47,2 \text{ тыс. руб. в год.}$$

Всего затрат на производство экструдированных кормовых продуктов:

а) стандартная технология:

$$B_{3,T} = 3_T + \Gamma_{\Phi} + A_T + \Gamma_{B,T} + \mathcal{E}_T = 2872,06 + 1632 + 300 + 5,27 + 49,56 = 4858,89$$

тыс. руб. в год.

б) предлагаемая технология:

$$B_{3,\Pi} = 3_{\Pi} + \Gamma_{\Phi} + A_{\Pi} + \Gamma_{B,\Pi} + \mathcal{E}_{\Pi} = 3335,4 + 1632 + 308 + 6,12 + 47,2 = 5328,8$$

тыс. руб. в год.

6) Себестоимость 1 т. составит:

а) стандартная технология

$$T_T = B_{3,T} / (D \cdot K_T) = 4858,89 / (236 \cdot 2,48) = 8,3 \text{ тыс. руб.}$$

б) предлагаемая технология

$$T_{\Pi} = B_{3,\Pi} / (D \cdot K_{\Pi}) = 5328,8 / (236 \cdot 2,88) = 7,8 \text{ тыс. руб.}$$

7) Расчет годовой стоимости продукции:

а) стандартная технология: выход готовой продукции,

$$B_T = 321,9 \text{ кг/ч}$$

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,

$$B_{\Pi} = 373,1 \text{ кг/ч}$$

годовая стоимость продукции:

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

8) Расчет прибыли от реализации продукции:

а) стандартная технология:

$$П_T = H_T - B_{3,T} = 7292,966 - 4858,89 = 2434,076 \text{ тыс. руб. в год.}$$

б) предлагаемая технология:

$$П_{\Pi} = H_{\Pi} - B_{3,\Pi} = 8805,16 - 5328,8 = 3476,36 \text{ тыс. руб. в год.}$$

9) Экономическая эффективность (рентабельность):

а) стандартная технология:

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

б) предлагаемая технология:

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

10) Определение срока окупаемости:

а) стандартная технология

$$CO_T = I_T / П_T = 1500 / 2434,076 = 0,6 \text{ года};$$

б) предлагаемая технология

$$CO_{II} = I_{II} / П_{II} = 1570 / 3476,36 = 0,45 \text{ года.}$$

11) Расчет затрат на один рубль товарной продукции:

а) стандартная технология:

$$M_T = B_{3,T} / П_T = 4858,89 / 2434,076 = 1,9 \text{ руб.};$$

б) предлагаемая технология:

$$M_{II} = B_{3,II} / П_{II} = 5328,8 / 3476,36 = 1,53 \text{ руб.}$$

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

– увеличить прибыль:

$$П = (П_{II} - П_T) = (3476,36 - 2434,076) = 1042,2 \text{ тыс. руб. или } 29 \%$$

– 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:

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

5.5.2 Определение экономической эффективности применения кормового продукта, полученного на разработанной конструкции пресс-экструдера, в кормлении крупного рогатого скота

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 конструк-

ции, учитывались затраты за период научно-хозяйственного опыта, в ценах на 2016 г. (табл. 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.

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 $t=20^{\circ}\text{C}$.

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 ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СИМВОЛОВ

$H_{p.ш.}$ – длина шнека пресс-экструдера, м; D_d – наружный диаметр винтовой линии шнека, м; W – шаг витков шнека, м; L/D – отношение шага винтовой лопасти шнека к наружному диаметру; $D_{ик}$ – внутренний диаметр шнековой камеры, м; ω_s – частота вращения шнека, об/мин; $z_1 = 0,08$ – расстояние от загрузочного устройства до устройства для измерения крутящего момента в конце зоны загрузки, м; $z_2 = 0,3$ – расстояние от загрузочного устройства до устройства для измерения крутящего момента в конце зоны плавления, м; $z_3 = 0,6$ – расстояние от загрузочного устройства до устройства для измерения крутящего момента в конце зоны дозирования, м; $D_s = 0,04$ – внутренний диаметр шнека, м; $\varphi_{изм}$ – 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; $\varphi_{исх}$ – исходный угол наклона винтовой линии шнека; $W_{изм}$ – измененный шаг винтовой линии шнека, м; $Ч_{об}$ – число оборотов резьбового вала, расположенного в теле шнека; F_r – сила трения между твердой пробкой и телом шнека, Н; F_{na} – нормальная сила, действующая на твердый слой на активной стороне нарезки, Н; F_{np} – нормальная сила, действующая на твердый слой на пассивной стороне нарезки, Н; F_{fa} – сила трения между твердой пробкой и активной стороной нарезки, Н; F_{fp} – сила трения между твердым слоем и пассивной стороной нарезки, Н; 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, Н; H – глубина канала, м; W – расстояние между витками шнека, м; φ – угол наклона витков шнека; θ – угол с плоскостью, перпендикулярной оси шнека; v_b – скорость цилиндра; v_{sx} – скоростью твердого слоя м/с; Δv – разность скоростей между цилиндром и твердым слоем, м/с; f_s – динамический коэффициент трения на поверхности

шнека; F – дополнительная нормальная сила, Н; f_b – динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра; x – расстояние от загрузочного устройства до измерительного элемента; P_0 – давление при $x=0$, Па; M_x – крутящий момент прессования в поперечном сечении, Н·м; P_x – давление, Па; M_u – крутящий момент в конце зоны загрузки, Н·м; M_{na} – крутящий момент в конце зоны плавления, Н·м; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} ; G – модуль упругости, Па; η – вязкость, Па·с; τ – касательное напряжение, Па; $\dot{\tau}$ – скорость изменения касательного напряжения, Па/с; ω'_s – частота вращения шнека, c^{-1} ; τ_{cu} – касательное напряжение у стенки, Па; k – коэффициент, зависящий от материала шнека и цилиндра; M_o – крутящий момент в конце зоны дозирования, Н·м; h_s – высота лопасти шнека, м; Q – пропускная способность матрицы, m^2/c ; M_n – крутящий момент, измеряемый насадкой, Н·м; L_1 – длина зазора, м; R_1 – расстояние до зазора, м; t – температура сырья на входе в экструдер $^{\circ}C$; t_1 – температура перерабатываемого материала, $^{\circ}C$; ρ – плотность материала в зонах шнековой камеры kg/m^3 ; p – полное напряжение, возникающее в перерабатываемом материале в зонах шнековой камеры, кПа; σ – нормальное напряжение, кПа; τ – касательное напряжение, кПа; F – усилие на срез, Н; УЗЭ – удельные затраты энергии, Вт/кг; S – площадь поперечного сечения экструдата, m^2 ; N_i – измеряемая мощность, Вт; Q – производительность пресс-экструдера, кг/ч; K – крошимость экструдата, %; m_1 – масса экструдата до испытаний, г; m_2 – масса экструдата после испытаний, г; D – диаметр гранулы экструдруемого материала, мм; ОЭ – обменная энергия, МДж; ВЭ – валовая энергия, МДж; СВ – количество сухого вещества, кг; сК – содержание сырой клетчатки, кг; сП – количество сырого протеина, кг; сЖ – количество сырого жира, кг; сК – количество сырой клетчатки, кг; сБЭВ – безазотистые экстрактивные вещества, кг; СВ – количество сухого вещества, кг; сЗ – количество сырой золы, кг; КОЭ – концентрация обменной энергии, МДж/кг СВ; ОЭ – количество обменной энергии, которое затрачивается организмом животного на производство продукции, МДж; ОЭ_{поддерж} – обменная энергия поддержания, МДж; ЧЭ_{поддерж} – чистая энергия поддержания, МДж;

A – абсолютный прирост, кг; $W_2 - W_1$ – разность начальной и конечной живой массой, кг; $A_{cp/cym}$ – среднесуточный прирост живой массы, кг; $t_2 - t_1$ – время от первого до второго взвешивания, мес; γ – объемный вес перерабатываемого материала, кг/м³; $v_{тв.м.}$ – скорость движения твердого материала, м/с; ω_1 – частота вращения ротора, с⁻¹; R_1 – расстояние до зазора, м; a – ширина зазора, м; $k_{зп}$ – коэффициент значимости показателя качества; B_{Ki} – присваиваемый балл качества; $K_{орг}$ – комплексный показатель органолептических свойств кормового продукта, баллы; $K_{ф-х}$ – комплексный показатель физико-химических свойств кормового продукта, баллы; $N_{ш}$ – полная мощность на валу шнекового пресс-экструдера, кВт; $q_{сек} = \sum f_0 v \cdot 100$ – объем выпрессованных за 1 секунду изделий в см³/сек; $\sum f_0$ – суммарная площадь живого сечения отверстий на матрице, см²; v – средняя скорость выпрессовывания изделий, м/сек; P_m – давление у матрицы, кг/см²; $\eta_{ш}$ – объемный коэффициент полезного действия шнека, для стандартной конструкции шнека $\eta_{ш} = 0,25$; Q – производительность пресс-экструдера, г/сек.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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. – С. 72 – 76. – ISBN 978-966-8736-05-6.

2. Арсений Н. М. и Шариков А. Ю. Влияние экструзии на сохранность аминокислот и пищевую ценность белка / Вопросы питания. – 2015. – №3. – С. 13 – 21.

3. Астарита, Д. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Д. Астарита, Д. Маруччи; перевод с английского под ред. Ю.А. Бувевича. – М.: Мир, 1978. – 309 с.

4. 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.

5. 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.

6. Баканов В.Н., Менькин В.К. Кормление сельскохозяйственных животных. – М.: Агропромиздат, 1989. – 511 с.

7. Бегачев, В.И. О взаимодействии окружной скорости и мощности при перемешивании / В.И. Бегачев // ТОХТ. – 1972. – № 2. – С. 260–280.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Бондарева, И.А. Совершенствование процесса гранулирования комбикормов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бондарева И. А. – М., 1985. – 22 с.
12. 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.
13. 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.
14. Буров, Л.А. Технологическое оборудование макаронных предприятий / Л.А. Буров, Г.М. Медведев. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 248 с.
15. 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.
16. Виноградов, Г.В. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, Л.Я. Малкин. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
17. Витюк, Л.А. Совершенствование процесса производства полуфабрикатов чипсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Витюк Лада Александровна. – М., 1999. – 27 с.
18. Выгодин, В.А. Экструзионная техника и технология: состояние, перспективы / В.А. Выгодин, В.Л. Касперович, Г.Б. Зиннохин, В.П. Попов, В.А. Буцко // Пищевая промышленность. – 1995. – №7. – С. 4 – 6.
19. 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.
20. 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.
21. Гиберов, З.Г. Механическое оборудование заводов пластических масс / З.Г. Гиберов. – М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Геррман, Х. Шнековые машины в технологии / Х. Геррман; пер. с нем. под ред. Л.М. Фридмана. – Л.: Химия, 1975. – 232 с.

26. 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.

27. 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.

28. Горбатов, А.В. Гидравлика и гидравлические машины для пластично-вязких мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов, В.Д. Косой, Я.М. Ви-ноградов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 176 с.

29. Горбатов, А.В. Реология мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.

30. 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.

31. Гришаев, И.Г. Оборудование для механических процессов химической технологии: учебное пособие / И.Г. Гришаев, В.И. Назаров. – М.: МИХМ., 1989 – 88 с.

32. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

33. 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.

34. 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.

35. Демский, А.Б. Справочник по оборудованию зерноперерабатывающих предприятий / А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – 383 с.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. Жислин, Я.М. Оборудование для производства комбикормов, обогатительных смесей и премиксов / Я.М. Жислин. – М.: Колос, 1981. – 319 с.

40. 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.

41. 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.

42. Зверкова, З. Н. Эффективность использования зерна озимой ржи при кормлении крупного рогатого скота: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.02.08 / Зинаида Николаевна Зверкова. – М., 2010. – С. 117.

43. Зубкова, Т.М. Исследование и оптимальное проектирование одношнековых прессующих механизмов экструдеров: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Зубкова Татьяна Михайловна. – Оуяярнбург: ОГУ, 1997. – 22 с.

44. Ионов, В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В.Н. Ионов, В.В. Селиванов. – М.: Мир, 1976. – т. 3. – с. 17 – 66.

45. Исследование прочности деталей машин при помощи тензодатчиков сопротивления / Под редакцией Г.С. Писаренко. – Киев: Техника, 1967.

46. Карабуля, Б.В. Экструзионная технология – перспективный способ создания новых пищевых продуктов / Б.В. Карабуля. – Кишинев: Молд-НИИНТИ, 1989. – С. 1 – 26.

47. Карпов, В.Г. Получение набухающих крахмалопродуктов экструзионным методом: дисс. ... канд. техн. наук: 0.5.18.05 / В.Г. Карпов. – М., 1981. – 158 с.

48. Карташов, Л.П. Системный синтез технологических объектов АПК / Л.П. Карташов, В.Ю. Полищук. – Екатеринбург: УрОРАН, 1998. – 185 с.

49. Кернев А.В., Ильинский А.В. Прогноз перевариваемости сырого протеина у молодняка крупного рогатого скота // Тез. докл. Всесоюз. совещания. – Боровск, 1990. – 37 с.

50. 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.

51. 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.

52. Клейменов, В.Н. Экструдирование зерновых кормов / В.Н. Клейменов, К.Б. Варганов // Научно-технический бюллетень по электрифика-

ции сельского хозяйства ВНИИ электрификации сельского хозяйства, 1984. – 152 с.

53. Кошелев, А.Н. Производство комбикормов и кормовых смесей / А.Н. Кошелев, Л.А. Глебов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 175с.

54. Кребс Г., Корнберг Г. Превращение энергии в живых системах // Изд. иностранной литературы. – М., 1959.

55. Кукта, Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г.М. Кукта. – М.: Агропропиздат, 1987. – 303 с.

56. Куликов В.М., Рубан Ю.Д. Общая зоотехния. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1982. – 560 с.

57. 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.

58. Курилов Н.В. и др. Изучение пищеварения у жвачных/ Методические указания / ВНИИФБиП с.-х. животных. – Боровск, 1987.

59. Ланина А.В. Формирование мясных качеств крупного рогатого скота // Автореф. дис. ... соиск. учен. степ. докт. с-х. наук. – М., 1962. – 61 с.

60. Лашинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А.А. Лашинский, А.Р. Толчинский. – Л.: Машиностроение, 1970. – 752 с.

61. 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.

62. Мак-Келвин, Д.М. Переработка полимеров / Д.М. Мак-Келвин; пер. с англ. – М.: Химия, 1965. – 442 с.

63. Малышев, П.Н. Исследование насосной зоны быстроходного червячного пресса: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13/П.Н. Малышев. – Л., 1967. – 32 с.

64. 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.

65. Мартыненко, Я.Ф. Промышленное производство комбикормов / Я.Ф. Мартыненко. – М.: Колос, 1975. – 216 с.

66. 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.

67. 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.

68. Мартынова, Д.В. Оптимизация процесса экструдирования белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья / Д.В. Мартынова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 3. – С. 151 – 156.

69. 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.

70. Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.

71. Медведев, Г.М. Разработка новых видов экструдированных сухих завтраков. Обзорная информация / Г.М. Медведев. – М.: ЦНИИТЭИ Хлебпрод-информ, 1995. – 18 с.

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

73. Мидлман, С. Течение полимеров / С. Мидлман. – М.: Мир, 1971. – 259 с.

74. Миллауэр, Х. Экструдеры и экструзионные установки / Х. Миллауэр // Семинар по технологии производства комбикормов: тез. докл. – М., 1989. – 23 с.

75. Молодцов, С.А. Комбикормовая промышленность за рубежом / С.А. Молодцов, В.Б. Зорин // ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР, Комбикормовая промышленность, экспресс-информация. – Вып.1 – 15 с.

76. 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.

77. Москалева, Н.А. Комбикормовая промышленность за рубежом / Н.А. Москалева // ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР. Хранение и переработка зерна, экспресс-информация. – 1988. – Вып. 8. – 18 с.

78. Мясное скотоводство. Под. Ред. Зелепухина А.Г. и Левахина В.И. – Оренбург.: Издательство ОГУ, 2000. – 350 с. ISBN 5-7410-0579-9.

79. Набил, В. Саид. Экструдеры «Инста – Про» в производстве комбикормов / В. Саид. Набил // Комбикормовая промышленность. – 1998. – №4. – С. 17 – 18.

80. Назаров, Н.И. Технология макаронных изделий / Н.И. Назаров. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 287 с.

81. 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.

82. Немец, И. Практическое применение тензорезисторов / И. Немец; пер. с чешск. – М.: Энергия, 1970. – 144 с.

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Методология, ошибки, перспективы / В. Г. Рядчиков // Сельскохозяйственная биология: Сер. биология животных. – 2006. – №4. – С. 68 – 81.

88. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А.П. Калашников, В.И. Фисинин, В.В.Щеглов, Н.И.Клейменов // Справочное пособие. – М., 2003. – С.152.

89. Огибалов, П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Нестационарные движения вязко-пластичных сред / П.М. Огибалов, А.Х. Мирзаджанзаде. – М.: Изд. МГУ, 1970. – 416 с.

90. 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.

91. Оспанов, А.А. Основы теории и моделирование процессов измельчения сыпучих масс / А.А. Оспанов, Н.В. Остапчук. – Алма-Ата.: Галым, 1992. – 244 с.

92. 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.

93. 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. – №3 Специальный выпуск журнала, «Математическое моделирование и компьютерные технологии» – С . 50 – 54.

94. 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.

95. 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.

96. 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.

97. Плохов, Ф.Г. Исследование динамики рабочего процесса молотковой дробилки замкнутого типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Ф.Г. Плохов. – М., – 1966. – 201с.

98. Праднтль, Л. Гидромеханика / Л. Праднтль; пер. с нем. – М.: Изд – во Иностр. лит. 1949.

99. Правила организации и ведения технологического процесса производства продукции комбикормовой промышленности. Воронеж, 1991. – 342с.

100. 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.

101. Полищук, В.Ю. Особенности шнекового прессующего механизма экструдера / В.Ю. Полищук // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1993. – №5. – С.19.

102. 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.

103. 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.

104. 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.

105. 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.

106. Пресс-экструдеры для получения полноценных кормов и кормовых добавок // Техника и оборудование для села. – 2002. – №1. С. 12.

107. 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.

108. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика – новая область науки / П.А. Ребиндер. – М.: Знание, 1958. – 64 с.

109. Реометрия пищевого сырья и продуктов: справочник / Под ред. Ю.А. Мачихина. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.

110. Рейнер, М. Деформация и течение / М. Рейнер. – М.: Гостоптехиздат, 1963.-318 с.

111. Рудик, Ф.Я. Закономерности массообменных процессов при переработке семян сои в корм / Ф.Я. Рудик, Н.Л. Моргунова, Ю.А. Кодацкий // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 5. – С. 70 – 73.

112. Рудик, Ф.Я. Повышение кормовой ценности зерна сои глубокой влажной обработкой / Ф.Я. Рудик, Ю.А. Кодацкий // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 1. – С. 41 – 42.

113. 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.

114. 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.

115. Свиридова, Т.М. Закономерности обмена веществ, энергии и формирования мясной продуктивности у молодняка мясного скота: Монография – Москва, 2003. – 312 с.

116. Севостьянов, М.В. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование / Н.Н. Дублин, С.А. Михайличенко, М.В. Севостьянов // «Строительные материалы». – 2004. – № 11. С. 2 – 5.

117. Силин, В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных механизмах / В.А. Силин.— М.: Машиностроение, 1972. – 147 с.

118. 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.

119. Соколов, А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. – М.: Колос, 1984. – 445 с.

120. Соколов, А.Я. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств / А.Я. Соколов. – М.: Машиностроение, 1969. – 637 с.

121. Спандиаров, Е. Разработка и совершенствование процессов и оборудования производства комбикормов: дис. ... докт. техн. наук / Е. Спандиаров. – М.: МГАПП, 1994. – 339 с.

122. 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.

123. Сыроватка, В. Оборудование и технические средства для приготовления комбикормов / В. Сыроватка, С. Рыжов // Комбикормовая промышленность. – 1997. – № 5 – С. 12 – 13.

124. Тадмор, З. Теоритические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос; пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

125. 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 моло-

дых ученых, аспирантов, студентов и старшекласников. – Самара – Оренбург: СамГУПС, 2015. – 278 – 280.

126. 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.

127. 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.

128. 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.

129. 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.

130. 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.

131. 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.

132. 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.

133. 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.

134. 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.

135. 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.

136. 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.

137. Титова, Г.П. Производство сухих завтраков в США / Г.П. Титова // М.ЦНИИЕЭК Пищепром СССР, 1979. – вып. 13. – 24 с.

138. Толстогузов, В.Б. Новые формы белковой пищи / В.Б. Толстогузов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 236 с.

139. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М.: Химия, 1977. – 464 с.

140. Трутнев М.А. Рекомендации по производству и скармливанию экструдированного зерна озимой ржи. – Пермь, 2012. – 28 с.

141. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

142. Урьев, Н.Б. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс / Н.Б. Урьев, М.А. Талейсник. – М.: Пищевая промышленность, 1994. – 240 с.

143. Ханин, В.П. Ресурсосберегающий процесс экструзионной обработки зернового сырья: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ханин Виктор Петрович. – Оренбург: ОГУ, 1999. – 130 с.

144. Чернов, Н.П. Производство карбамидного концентрата / Н.П. Чернов. – М.: Колос, 1980, – 138 с.

145. 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.

146. 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.

147. 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.

148. Шмалько Н.А., Беликова А.В. и Росляков Ю.Ф. Использование экструдированных продуктов в хлебопечении / Фундаментальные исследования. – 2007. – № 7 – С. 90 – 92.

149. Шрейдер М. Ю. Автоматизация процессов смешивания и пресования макаронного теста: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Марина Юрьевна Шрейдер. – Оренбург, 2008. – 118 с.

150. 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.

151. 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.

152. 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.

153. Chung, C.I. A new theory for single-screw extrusion / *Modern Plast.* – 1968. – №9. – P. 178 – 198.

154. Chung, C. I. New ideas about solids conveying in screw extruders / *Soc. Plast. Eng. J.* – 1970. – № 26(5). – P. 32 – 44.

155. 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.

156. 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

157. Darnell W.H., Mol E.A.J. Solids conveying in extruders / *Society of Plastics Engineers Journal.* – 1956. – №12. – P. 20 – 29.

158. Dekker J. Verbesserte schneckenkonstruktion fur das extrudieren von polypropylen / *Kunststoffe.* – 1976. – № 66. – P. 130 – 135.

159. Donovan, R.C. Pressure profiles in plasticating extruders / *Polym. Eng. Sci.* – 1971. – № 11. – P. 247 – 257.

160. 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.

161. Edmondson I.R., Fenner R.T. Melting of thermoplastics in single screw extruders / *Polymer.* – 1975. – № 16. – P. 49 – 56. – ISSN: 0032-3861.

162. Edmondson, I. R., Ph.D. Thesis, University of London (1972).

163. 60. Fahey, T.E., M.Sc. Thesis, Case Western Reserve Univ., September (1981).

164. Fenner, R.T. Developments in the analysis of steady screw extrusion of polymers / *Polymer.* – 1977. – № 18. – P. 617 – 635.

165. Gale, G.M., *Plastics and Polymer*, 6, 183 (1970).

166. 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.

167. 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.

168. 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.

169. Hinrichs, D.R. A modified melting model for plastifying extruders / D.R. Hinrichs, L.U. Lilleleht // *Polym. Eng. Sci.* – 1970. – № 5 – P. 268 – 278.

170. Judson, M. Harper Extrusion of Foods: Volume II / M. Harper Judson. – Boca Raton, Florida: CRC Press, 1981. – 212 p.

171. Klenk, P. Plastifiziermodelle für die verarbeitung benetzender und nichtbenetzender thermoplaste auf einschnecken extrudern / P. Klenk // *Rheologica Acta*. – 1968. – № 7. – P. 75 – 78.

172. 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.

173. Klenk, P. Visuelle untersuchungen zum wandgleitverhaltenhochpolymerer, schmelzen / P. Klenk. – *Plastverarbeiter* 21, 1968. – 537 p.

174. 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.

175. 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.

176. 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.

177. Menges G. Ingenieurmäßige festigkeitsrechnung für spritzgussteile aus thermoplasten / G. Menges, P. Klenk // *Kunststoffe*. – 1967. – № 57. – P. 2 – 8.

178. Menning J., *Kunststoffe*, 71, 359 – 362 (1981).

179. 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.

180. 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.

181. 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.

182. Rautenbach, R., Goldacker E. Zur optimalen gestaltung der einzugszone von einschneckenextrudern / *Kunststoffe*, Muenchen. – 1971. – № 61. – P. 104 – 107.

183. Rauwendaal, C. Melting theory for temperatyre-development fluids, exact analytical solution for powser law fluids / *Adv. Polum. Techn.* – 1992. – № 11. – P. 19 – 25.

184. Shapiro, J. Nonorientable dual loop graphs and isospin / *J. Shapiro // Phys. Rev.* – 1971. – № 4. – P. 1249 – 1251.

185. Shapiro, J. Melting in single screw extruders / J. Shapiro, A.L. Halmos, J.R.A. Pearson // *Polymer*. – 1976. – № 17. – P. 905 – 918.

186. Schneeweib, R. Die extrusionein technologisches verfahren zur herstelland von lebensmitteln / R. Schneeweib, E. Maack, W. Schneille // *Lebensmittelindustrie*. – 1983. – №3. P. 391 – 396.

187. Seller, K. Rohstoffe fur extrudate zum anbad vor riegeln / K. Seller // *Cordian*. – 1985. – № 4. – P. 60-64.

188. Seller, K. Rohstoffe und extrusion. Verhoiten ligiger rohstoffe und cetreidebasses wahrenddes extrusionsprozess / K. Seller // *Cordian* – 1980. – № 10. – P. 35-242.

189. Sundstrom, D.W., Young C.C. Rate of melting of crystalline polymers under shear conditionsand / *Polym. Eng. Sci.* – 1972. – № 12. – P. 59 – 63.

190. Sundstrom, D.W. Softening rates of polystyrene under shear conditions / D.W. Sundstrom, J.R. Lo // *Polym. Eng. Sci.* – 1978. – № 18. – P. 422 – 426.

191. Tadmor, Z. Method and apparatus for processing polymeric materials. Patent U.S., № 4.194.841, 1980.

192. Tadmor, Z., Duvdevani I., Klein I. Melting in plasticating extruders—theory and experiments / *Polym. Eng. Sci.* – 1967. – № 7. – P. 198 – 217.

193. Tadmor, Z., Broyer E. Solids conveying in screw extruders. Part II. Non Isothermal model / *Polym. Eng. Sci.* – 1972. – № 12. – P. 378 – 386.

194. Tadmor, Z. Engineering principles of plasticating extrusion / Z. Tadmor, I. Klein. – Van Nostrand Reinhold, NY, 1970. – 503 p.
195. Van Lengerich B., Mauser F., Pfaller W. What is uni qui: structure, composition processing and products. Ed. By Pomeranz Y. – St. Paul Minnesota. – American Association of Cereal Chemists., 1989. – Part C, ch.23.
196. 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.
197. 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.
198. 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.
199. Viriyayuthakorn M., Kassahun B. A three dimensional model for plasticating extrusion screw design / SPE ANTEC, New Orleans. – 1984. – Vol. 30. – P. 81 – 84.
200. Wang, Y., Polym. Eng. Sci., 3, p. 204 (1991).
201. Yuryev V.P., Likhodzievskaya I.B., Zasytkin 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 / Narung. – 1989. – Vol. 33. – № 9. – P. 823 – 830.
202. Yuryev V.P., Zasytkin 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.

Научное издание

Д.В. Мартынова, В.П. Попов, В.П., Ханин, Г.Б. Зинюхин,
С.В. Антимонов, Г.А. Сидоренко

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

Монография

ISBN 978-5-4417-0738-1



Подписано в печать 24.04.2018 г.
Формат 60x84/16. Бумага писчая. Цена свободная.
Усл. печ. листов 12,9. Тираж 300. Заказ 039.
ООО ИПК «Университет»
460007, г. Оренбург, ул. М. Джалиля, 6.
E-mail: ipk_universitet@mail.ru
Тел./факс: (3532) 90-00-26
