

**Богданов Кирилл Андреевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ЭКСТРУДИРОВАНИЯ САПРОПЕЛЕЗЕРНОВОГО КОРМА С  
ОБОСНОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУДЕРА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельскохозяйственного производства

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Великие Луки 2021 г.

Работа выполнена на кафедре «Автомобили, тракторы и сельскохозяйственные машины» в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА).

**Научный руководитель:** **Морозов Владимир Васильевич** доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Шулятьев Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный агротехнологический университет», профессор кафедры технологического и энергетического оборудования;  
**Исупов Алексей Юрьевич**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный аграрный университет"

Защита состоится «09» декабря 2021 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 006.048.02 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В.Рудницкого» по адресу: 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166 а, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» и на официальном сайте <http://fanc-sv.ru/>.

Автореферат разослан «08» сентября 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Глушков Андрей Леонидович

**Актуальность темы исследования:**

Животноводство является одной из важнейших отраслей сельского хозяйства. Данная отрасль занимается производством сельскохозяйственной продукции для обеспечения населения: мясом, молоком, шерстью и продуктами питания. Кроме того, развитие этой отрасли обеспечивает продовольственную безопасность страны.

Увеличение общего объема производимой продукции животноводства связана с развитием кормопроизводства. В нашей стране более 30 % от общего объема производимых кормов составляют концентрированные корма.

Перед учеными стоит задача повышения эффективности производства концентрированных кормов для сельскохозяйственных животных путем улучшения их качества и снижения себестоимости. Необходимо, чтобы такой корм был хорошо усваиваем, имел низкую стоимость, дополнял организм животного полезными минеральными веществами и витаминами. Повысить эффективность кормов можно путем использования сапропеля в качестве добавки к корму, который позволит обогатить организм животного витаминами и минералами. Установлено, что добавление сапропеля в корм животного способствует более активному набору массы. Поросята, получавшие в 6 месячном возрасте по 1 килограмму сапропеля, имели суточный прирост на 11-30% больше чем животные получавшие меловую подкормку. При этом затраты корма на единицу привеса снизились на 14 %. Добавление в корм цыплятам-бройлеров сапропеля способствует повышению скорости их роста до 2.5% и снижению затрат корма до 17.7%. Скармливание сапропеля крупному рогатому скоту позволяет увеличить надои на 1-2 кг. в сутки.

Для того чтобы повысить усвояемость и питательную ценность корма необходимо перед скармливанием улучшить его свойства. В настоящее время наиболее целесообразно для этого используют экструдирование. Применение экструдированных кормов при кормлении животных позволяет: увеличить прирост живой массы свиней на 5 – 10 %; увеличить надои крупного рогатого скота на 25 – 30 %, а прирост живой массы до 10 – 20 %; увеличить яйценоскость птицы на 10 %, а прирост живой массы на 10 – 20 %.

Экструдирование помимо увеличения питательной ценности корма способствует улучшению хранения корма за счет уничтожения вредных микроорганизмов и испарения влаги. Экструдер позволяет отказаться от целого комплекса машин за счет выполнения сразу нескольких операций. На экструдере происходит выполнение следующих операций кормоприготовления: перемешивание, измельчение, обработка давлением и температурой, стерилизация и гранулирование.

Для производства качественного корма необходимо совершенствование агрегатов по приготовлению и переработке кормового материала с добавлением сапропеля.

**Степень разработанности темы:**

Вопросами теории, и экспериментального изучения процесса производства кормовых добавок на основе сапропеля в разное время занимались П.Ф. Солдатенков, И.Г. Елисеев, М.З. Лопотко, В.М. Дудин, В.В. Морозов, С.О.

Антипов, В.Г. Игнатенков и др. Ими рассматривался процесс перемешивания двухкомпонентных смесей в шнековых смесителях. Получены математические зависимости и уравнения для определения химического и микробиологического состава сапропеля в зависимости от глубины залегания. Рассмотрено производство витаминно-кормовой добавки, состоящей из пророщенного на сапропеле зерна, позволяющей обогатить организм животного витамина С и Е и приблизить зимний рацион животного к летнему. Однако, в настоящее время полностью не исследован вопрос экструдирования сапропелезернового корма. Используемые в настоящее время экструдеры полностью не удовлетворяют требованиям для обработки предлагаемой смеси. Вопросами экструдирования кормов и изучением работы экструдера уделяли большое внимание ученые: И.Э. Груздева; В.В. Новиков; В.И. Сыроватка; Т.М. Зубкова; С.В. Денисов; Е.С. Макаров; Д.В. Мартынова; Е.В. Пепеляева; В.В. Успенский; Д.А. Мусиенко; В.В. Петров; В.Н. Клейменов и др. Эти работы внесли большой вклад в развитие кормопроизводства. Но в них не рассматривалось экструдирование кормов с добавлением сапропеля.

**Цель работы** – совершенствование процесса экструдирования сапропелезернового корма с обоснованием конструктивно-технологических параметров экструдера.

**Задачи исследований:**

1. Усовершенствовать технологический процесс экструдирования сапропелезерновой смеси в рабочих органах экструдера.
2. Разработать математическую модель отражающую изменение давления по длине шнека экструдера с учетом физико-механических свойств сапропелезерновой смеси и математические модели для обоснования конструктивно технологических параметров экструдера для производства сапропелезернового корма.
3. Провести экспериментальную проверку математических зависимостей процесса экструдирования и установить рациональные конструкционные и технологические параметры рабочих органов пресс экструдера, обеспечивающих наименьшие затраты на производство качественного экструдированного сапропелезернового корма.
4. Провести исследование по влиянию на рост и развитие птицы экструдированного сапропелезернового корма.
5. Дать экономическое обоснование использования предлагаемой установки для экструдирования сапропелезернового корма.

**Объект исследований** – технологический процесс экструдирования сапропелезерновой смеси в рабочих органах экструдера.

**Предмет исследований** – пресс-экструдер для производства сапропелезернового корма.

**Научную новизну** работы составляют:

- конструктивно-технологическая схема шнекового рабочего органа экструдера с двухзаходным шнеком и коническими компрессионными кольцами, обеспечивающие повышение качества сапропелезернового корма;
- математическая модель процесса экструдирования сапропелезернового корма, аналитические зависимости: изменения давления по длине шнека

экструдера; определения температуры обработки смеси; производительности экструдера и мощности, затрачиваемой на процесс экструдирования.

#### **Теоретическая и практическая значимость:**

Результаты теоретических исследований являются базой для совершенствования технологического процесса экструдирования сапропелезернового корма и обоснования конструктивных и технологических параметров экструдера. Полученные результаты исследований позволят сельскохозяйственным предприятиям совершенствовать экструдеры.

#### **На защиту выносятся:**

- конструктивно-технологическая схема шнекового рабочего органа экструдера;
- аналитические зависимости для определения конструктивных параметров рабочего органа экструдера;
- результаты исследований по оптимизации конструктивных параметров и режимов работы рабочего органа экструдера;
- технико-экономические показатели работы экструдера для экструдирования сапропелезернового корма.

#### **Публикации.**

По материалам исследования опубликовано 8 печатных работы, среди которых 3 работы опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК и 2 работы в журналах, которые индексируется в базе Scopus.

#### **Апробация работы.**

Основные положения научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались:

- На XIV международной научно-практической конференции молодых ученых «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА 2019 год;
- На XV международной научно-практической конференции молодых ученых «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА 2020 год;
- На Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение инновационного развития АПК» ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА 2020 год;
- На Международной научно-практической конференции «Агроинженерные исследования в условиях глобализации и интеграции» ФГБОУ ВО Донской ГАУ 2020 год.
- На международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава «Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики», посвященной Году науки и технологий, ФГБОУ ВО СПбГАУ 2021 год.

#### **Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка принятых сокращений, четырех приложений. Основная часть

изложена на 147 листах формата А4 машинописного текста, содержит 61 рисунок, 11 таблиц. Список литературы представлен 138 источниками.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель, объект исследования, предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** «Состояние вопроса и задачи исследования» произведен анализ существующих способов и технических средств производства кормов. По результатам анализа было обосновано использование в качестве корма для сельскохозяйственных животных экструдированного сапропелезернового корма. Обработка корма методом экструдирования позволяет преобразовать крахмал и белок в более доступную форму для животных. При обработке корма этим методом улучшается питательная ценность корма, и его хранение. Применение экструдированного корма положительно влияет на разных сельскохозяйственных животных. Для свиней увеличивается репродуктивность на 10 – 15 %, крупноплодность на 5- 8%, наблюдается прирост живой массы, снижается себестоимость выращивания поросят на 30 – 40 %. Кормление крупного рогатого скота экструдированным кормом позволяет увеличить надои, прирост живой массы увеличивается на 10 – 20 %. Птицы, потребляющие экструдированный корм, увеличивают яйценоскость, прирост живой массы увеличивается на 10 – 20 %.

Для улучшения рациона животных и обеспечения их организма витаминами и минералами в качестве одного из элементов целесообразно добавлять в корм сапропель, богатый витаминами и минеральными веществами.

В результате анализа работ по экструдированию кормов и анализа конструкций экструдеров было установлено, что для производства экструдированного сапропелезернового корма целесообразно усовершенствовать рабочий орган экструдера с учетом необходимых режимов обработки сапропелезерновой смеси и его физико-механические свойства. Сапропель не теряет своих положительных свойств для животных при кратковременной обработке температурой до 140 °С. Минимальная температура при которой происходит обработка корма в экструдере составляет 120 °С. Поэтому усовершенствованный рабочий орган должен производить обработку корма в данном температурном диапазоне.

Принято решение использовать в усовершенствованном экструдере составной двухзаходный шнек с увеличенным шагом в зоне питания и конические компрессионные кольца.

Применение двухзаходного шнека обусловлено следующим:

1. За счет дополнительного гребня на валу возрастает давление, что приводит к увеличению трения между материалом и рабочей частью экструдера и позволит сократить общую длину шнека.

2. За счет дополнительных гребней на валу увеличивается площадь контакта материала с вращающимися частями рабочих органов экструдера. Это позволит быстрее выходить на заданную температуру обработки.

Применение конических компрессионных колец позволит снизить расход энергии и обеспечить лучшее прохождение материала, что повлияет на уменьшение забиваемости рабочей части экструдера. Конструктивные параметры колец значительно влияют на температуру обработки в экструдере.

**Во второй главе** «Математическое обоснование процесса экструдирования корма» представлены разработанные математические модели для обоснования конструктивно-технологических параметров экструдера для производства сапропелезернового корма.

Для обоснования конструктивных и технологических параметров рабочего органа экструдера необходимо рассмотреть процесс изменения давления в экструдере в разных точках шнека. Наибольшее влияние на давление экструдирования оказывает давление перед формующей головкой (фильерой). Данное давление влияет на изменение давления по всей длине шнека экструдера.

Для нахождения этого давления рассмотрено движение материала в формующей головке экструдера (рис. 1).

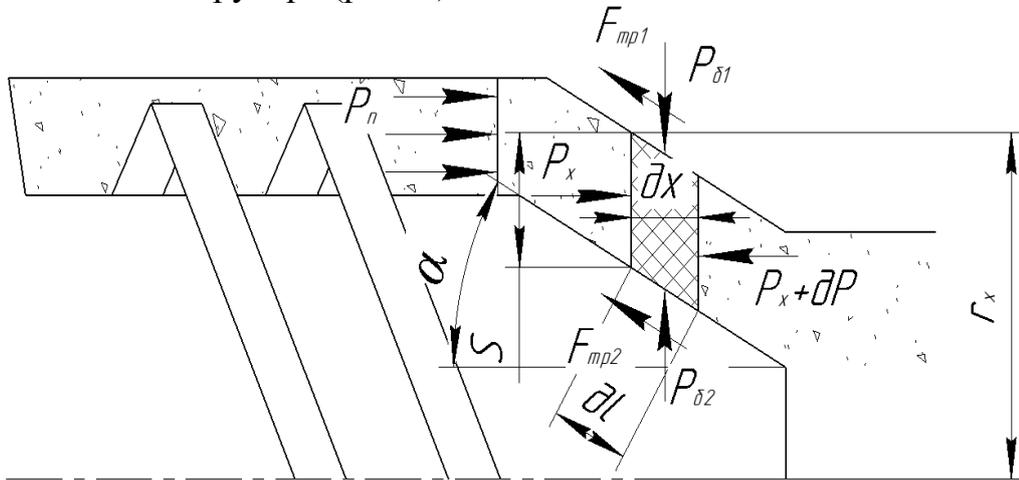


Рисунок 1 – Движение материала в формующей головке экструдера

Используя данную схему составим дифференциальное уравнение равновесия относительно горизонтальной оси X.

$$P_x(2\pi Sr_x - \pi S^2) - (P_x + dP)\pi(2\pi Sr_x - \pi S^2) - F_{тр1} \cos \alpha - F_{тр2} \cos \alpha = 0 \quad (1)$$

где  $P_x$  – давление на текущем участке канала;  $F_{тр1}$ ;  $F_{тр2}$  – силы трения на стенке фильеры и вала соответственно;  $S$  – зазор между фильерой и валом;  $\alpha$  – угол наклона образующей конуса;  $r_x$  – радиус текущего участка канала.

Решив данное уравнение, получили давление прессования перед формующей головкой (фильерой):

$$P_{\Pi} = \frac{P_0}{e^{\frac{2\xi fl \cos \alpha}{S}}} \quad (2)$$

где  $\xi = \mu/(1 + \mu)$  – коэффициент бокового давления;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $P_0$  – давление на выходе из отверстия;  $l$  – длина отверстия, м.  $f$  – коэффициент трения;

Установлено что наибольшее влияние на давление перед формующей головкой оказывает длина  $l$  и площадь проходного отверстия формующей головки  $S_{отв}$ . На графике (рис. 2а) видно, что при увеличении длины фильеры увеличивается

и давление выпрессовывания. Данная зависимость позволяет еще на этапе проектирования экструдера задавать необходимую длину фильеры, для создания максимального давления обработки корма. Анализируя график (рис. 2б) можно сделать вывод, что при увеличении проходного сечения давление уменьшается. Данная зависимость позволяет изменять в процессе эксплуатации экструдера давление обработки корма в зависимости от его состава.

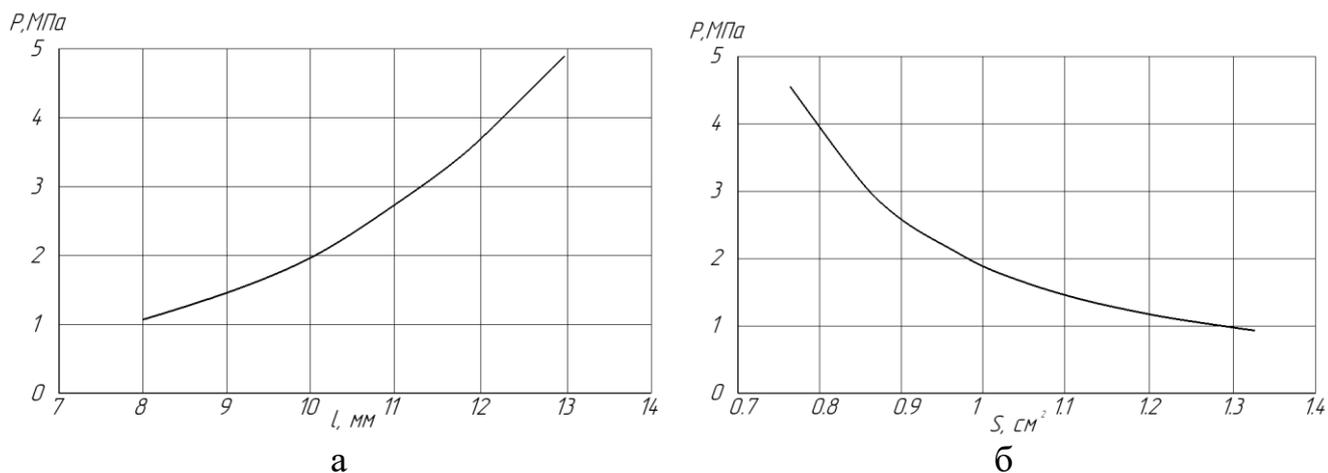


Рисунок 2 – Зависимость давления перед формующей головкой от конструктивных параметров фильеры.

Для быстрого роста давления и температуры в экструдере используют компрессионные затворы. Их применение способствует по всей длине шнека развивать высокое давление. Благодаря этому нагрев смеси происходит быстрее и появляется возможность уменьшения длины шнека. Наличие компрессионного затвора также способствует гомогенизации перерабатываемого корма.

Для определения давления прессования перед компрессионным затвором  $P_n$  сапропелезерновой смеси составим схему деформации материала при прохождении через конический зазор (рис. 3).

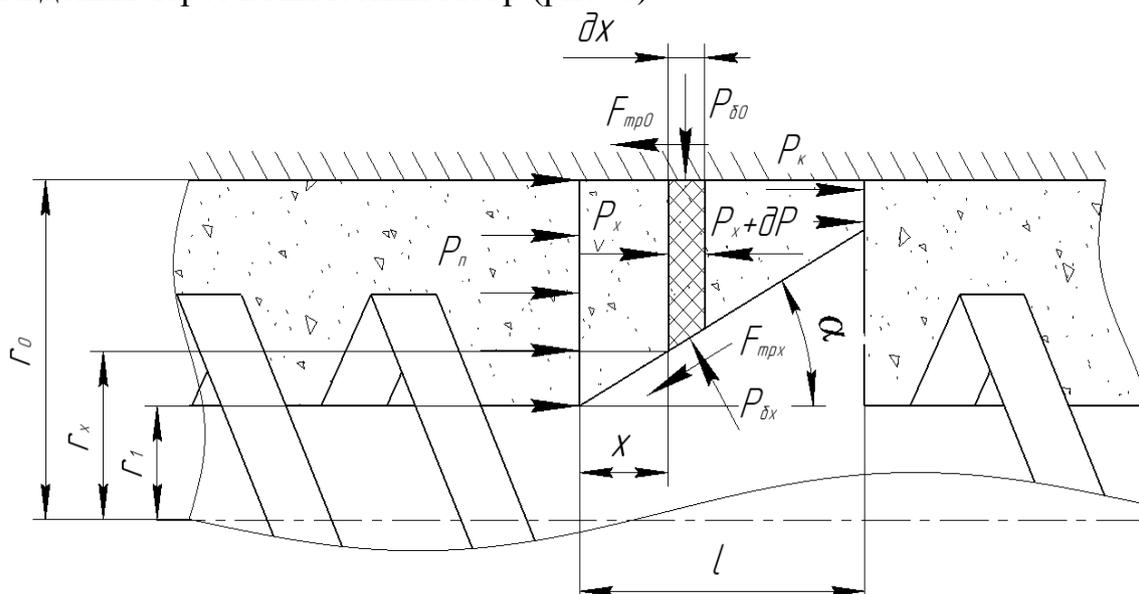


Рисунок 3 – Движение материала в компрессионном затворе экструдера

Используя данную схему составим дифференциальное уравнение равновесия относительно горизонтальной оси  $X$ .

$$P_x \pi (r_0^2 - r_x^2) - (P_x + dP) \pi (r_0^2 - r_x^2) - F_{\text{тр}0} - F_{\text{тр}x} \cos \alpha - P_{6x} 2\pi r_x dl \sin \alpha = 0 \quad (3)$$

где  $P_x$  – давление на текущем участке компрессионного затвора;  $F_{\text{тр}0}$ ;  $F_{\text{тр}x}$  – силы трения на стенке цилиндра и компрессионного кольца соответственно;  $P_{6x}$  – боковое давление на стенке компрессионного кольца;  $r_x$  – радиус текущего участка компрессионного кольца;  $r_0$  – радиус цилиндра экструдера;  $\alpha$  – угол конуса компрессионного кольца.

Решив данное уравнение, получили зависимость для нахождения давления прессования:

$$P_{\text{п}} = \frac{P_{\text{к}}}{\left( \frac{(r_1 + l \operatorname{tg} \alpha)^2}{r_1^2 - r_0^2} \right)^{0,5} \xi \left( \frac{2f}{\operatorname{tg} \alpha} - 1 - f^2 \right)} \quad (4)$$

где  $r_1$  – начальный радиус кольца;  $l$  – длина компрессионного кольца;  $P_{\text{к}}$  – давление после компрессионного кольца.

Используя полученную зависимость построим график (рис. 4) изменения давления прессования перед компрессионным кольцом от его длины. На графике видно, что при увеличении длины компрессионного кольца давление увеличивается, а это значит что будет расти и среднее давление экструдирования и температура обработки. Длину компрессионного кольца можно изменять на экструдере в процессе работы в зависимости от необходимых режимов обработки смеси.

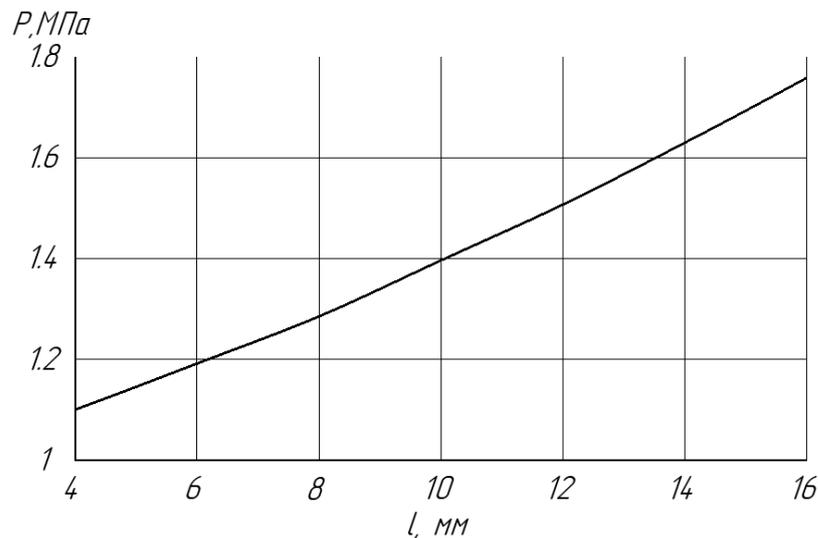


Рисунок 4 – Изменение давления прессования перед компрессионным кольцом от его длины.

Зависимость давления создаваемого шнеком линейна по его длине. Исходя из этого запишем уравнение для расчета давления после компрессионных затворов  $P_{\text{к}2}$  и  $P_{\text{к}1}$ .

$$P_{\text{к}2} = \frac{P_{\text{п}}(l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (5)$$

$$P_{\text{к}1} = \frac{P_{\text{п}2} l_1}{l_1 + l_2} \quad (6)$$

где  $P_{п1}$  – давление прессования перед фильерой;  $P_{п2}$  – давление прессования перед вторым компрессионным кольцом  $l_1; l_2; l_3$  – длина 1-го, 2-го, 3-го участков шнека соответственно.

На рисунке 5 представлены графики изменения давления в конструкции экструдера с компрессионными затворами  $P_{к}$  и без них  $P_{ш}$ . На рисунке видно, что применение конических компрессионных затворов увеличивает среднее давление смеси в экструдере, а это значит, что нагрев смеси будет происходить интенсивнее, что позволяет уменьшить длину шнека.

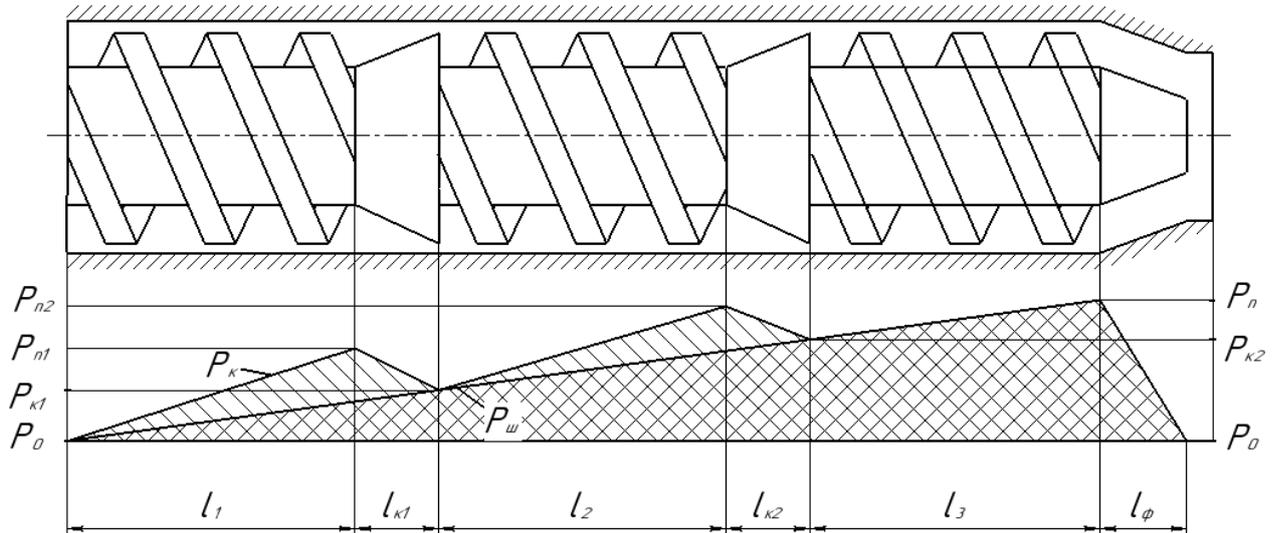


Рисунок 5 – Изменение давления в шнековом экструдере с коническими компрессионными кольцами

Для повышения эффективности процесса приготовления экструдированных кормов необходимо теоретически обосновать ряд конструктивных параметров рабочих органов экструдера. Наибольшее влияние на работу экструдера и качество получаемой сапропелезерновой смеси оказывает температура обработки смеси.

Для расчета нагревания сапропелезерновой смеси в рабочем органе экструдера разделим суммарную работу силы трения на массу обрабатываемой смеси и удельную теплоёмкость:

$$\Delta Q = \frac{\sum A}{\sum M \cdot c} \quad (7)$$

где  $\sum M$  – масса смеси, обрабатываемая за один цикл работы;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\sum A$  – суммарная работа силы трения за один цикл.

Для рассмотрения процесса нагревания материала в экструдере представим навивку шнека в виде двух параллельных пластин (рис. 6). Движение материала происходит слева направо за счет действия со стороны гребня витка давления.

Используя рисунок 6 определим работу силу трения на первом, втором и третьем шнеке, затем просуммировав эти значения получим работу силы трения на всем шнеке экструдера за один цикл работы:

$$\sum A = \frac{l_1^2 \mu (2h_{в1} + l_{в1}) (2P_{н1} + P_0)}{6 \sin \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} + \frac{l_2^2 \mu (2h_{в2} + l_{в2}) (2P_{н2} + P_{к1})}{3 \sin \alpha_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} + \frac{l_3^2 \mu (2h_{в3} + l_{в3}) (2P_{н3} + P_{к2})}{3 \sin \alpha_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_3}; \quad (8)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – угол подачи на первом, втором и третьем шнеке соответственно;

$h_{B1}; h_{B2}; h_{B3}$  – высота гребня шнека на первом, втором и третьем шнеке соответственно;

$l_{B1}; l_{B2}; l_{B3}$  – расстояние между соседними витками на первом, втором и третьем шнеке соответственно;

$P_0; P_{K1}; P_{K2}$  – давление в начале первого, второго и третьего участка шнека соответственно;

$P_{n1}; P_{n2}; P_{n3}$  – давление в конце первого, второго и третьего участка шнека соответственно;

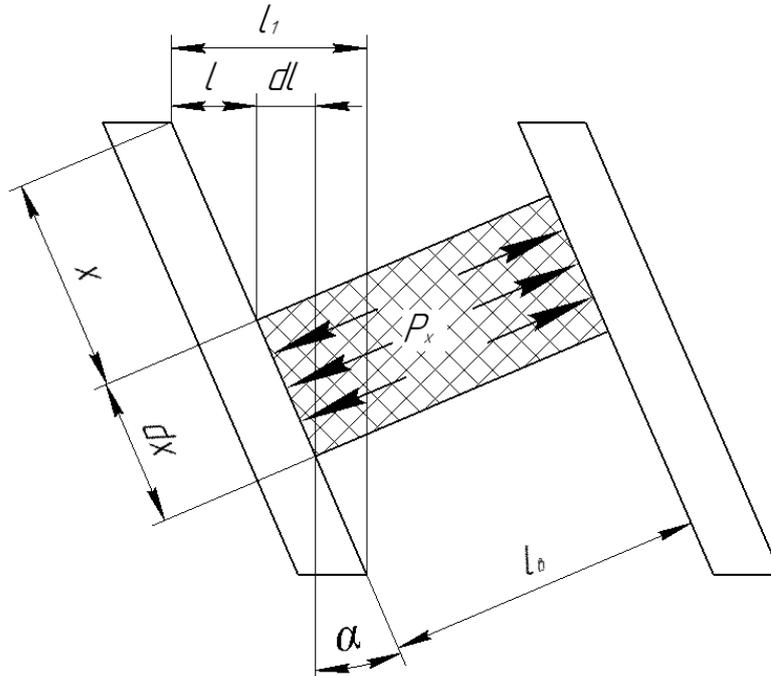


Рисунок 6 – Определение работы трения

Используя рисунок 7 определим объем межвиткового пространства шнека, а затем и суммарную массу сапропелезерновой смеси обрабатываемую за один цикл работы:

$$\begin{aligned} \sum M = \rho & \left( \frac{l_1}{T_1} \left( T_1 \pi (2h_{B1} r_{BH1} - h_{B1}^2) - 2\delta_{B1} h_{B1} T_1 \sqrt{1 + ctg^2 \alpha_1} \right) + \right. \\ & + \frac{l_1}{T_2} \left( T_2 \pi (2h_{B2} r_{BH2} - h_{B2}^2) - 2\delta_{B2} h_{B2} T_2 \sqrt{1 + ctg^2 \alpha_2} \right) + \\ & \left. + \frac{l_1}{T_2} \left( T_2 \pi (2h_{B2} r_{BH2} - h_{B2}^2) - 2\delta_{B2} h_{B2} T_2 \sqrt{1 + ctg^2 \alpha_2} \right) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

где  $T_1; T_2; T_3$  – шаг первого, второго и третьего участка шнека экструдера соответственно;

$r_{BH1}; r_{BH2}; r_{BH3}$  – внешний радиус зуба шнека первого, второго и третьего участка шнека соответственно;

$\delta_{B1}; \delta_{B2}; \delta_{B3}$  – ширина зуба шнека первого, второго и третьего участка шнека соответственно.

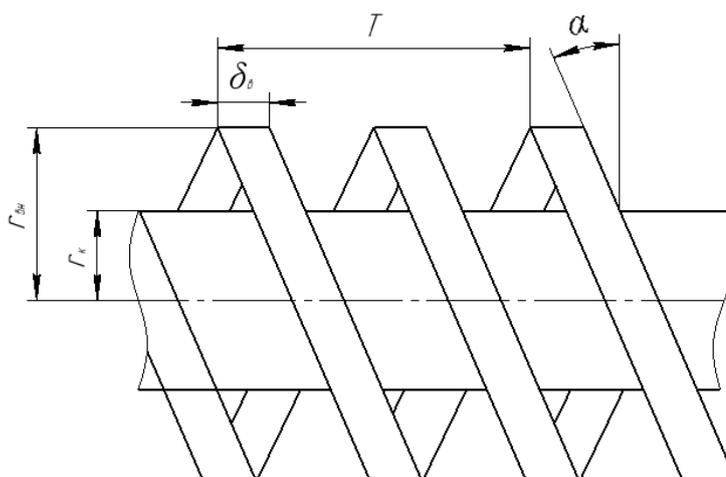


Рисунок 7 – Конструкция шнека.

На значение температуры обработки смеси существенное влияние оказывает давление в экструдере. Изменение давления можно осуществить за счет изменения длины компрессионных затворов и изменения площади выходного отверстия фильеры. Используя формулу 7 построим график влияния изменения длины компрессионных колец на температуру обработки сапропелезернового корма (рис. 8а). Анализируя данные графика можно сделать вывод, что с помощью изменения длины компрессионного кольца можно существенно изменять температуру обработки корма. Используя формулу 7 построим график влияния изменения площади проходного сечения фильеры  $S_{отв}$  на температуру обработки сапропелезернового корма (рисунок 8б). На полученном графике видно, что увеличение площади проходного сечения фильеры приводит к уменьшению температуры обработки смеси. В процессе эксплуатации за счет изменения проходного сечения фильеры можно корректировать температурный режим в зависимости от обрабатываемого материала, однако следует учесть, что подобное регулирование сказывается на производительности экструдера.

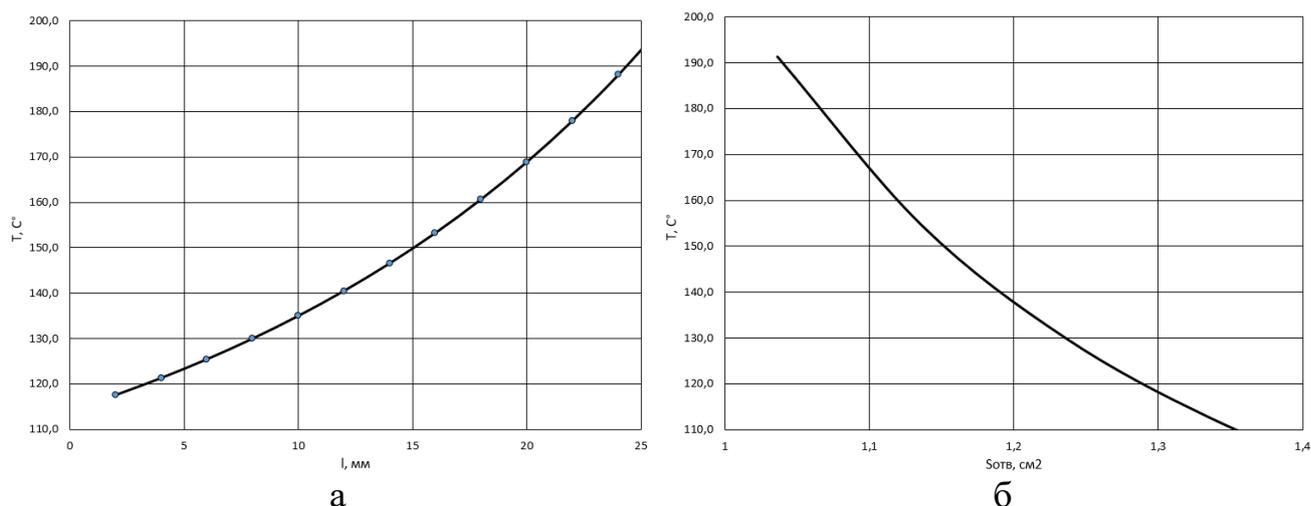


Рисунок 8 – Зависимость изменения температуры обработки смеси от конструктивных параметров экструдера

Для расчета мощности, разделим суммарную работу за один цикл работы на частоту вращения вала и число оборотов за один цикл работы:

$$N = \sum A \omega / 2\pi z \quad (10)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения шнека экструдера  $z$  – число витков на валу.

Для оценки производительности экструдера рассмотрим первую зону шнека. Так как проходя через компрессионные затворы сапропелезерновая смесь уплотняется и при одинаковом шаге шнека наименьшая производительность будет в транспортной зоне. Следовательно, шнек транспортной зоны будет определять производительность всей машины. Производительность определим, как массу смеси в одном витке первого участка шнека умноженную на время одного оборота, с учетом противотока материала:

$$Q_э = \rho \left( T\pi(2h_в r_{вн} - h_в^2) - 2\delta_в h_в T \sqrt{1 + ctg^2 \alpha} \right) \frac{\omega}{2\pi} * \\ * \left( 1 - \frac{P_{п1} 2(r_{вн} - r_к) T}{\pi r_{вн}^2 \omega \eta z} \right) \quad (11)$$

где  $\eta$  – эффективная вязкость продукта,  $\rho$  – плотность смеси.

Из формулы 11 получим зависимость производительности от изменения площади проходного сечения фильеры  $S_{отв}$  (рис. 9а). На графике видно, что при увеличении площади проходного сечения фильеры увеличивается и производительность. Однако при этом согласно графику, на рисунке 8б изменяется температура обработки. Поэтому допускается незначительная регулировка площади проходного сечения в процессе эксплуатации экструдера. Для регулировки производительности можно изменять частоту вращения вала экструдера. На графике видно, что при увеличении этого показателя увеличивается и производительность.

На производительность существенное влияние оказывает шаг и радиус шнека. Из формулы 9 получим зависимость производительности от изменения шага шнека  $T$  (рис. 9б). На графике видно, что увеличение шага шнека приводит к увеличению производительности. Однако при значительном увеличении шага шнека производительность перестает увеличиваться и даже немного снижается за счет увеличения сопротивления в компрессионных затворах и увеличении рециркуляции смеси в экструдере. Увеличения радиуса шнека также увеличивает производительность экструдера.

Для повышения производительности и при этом незначительного уменьшения температуры обработки смеси можно увеличить шаг шнека транспортной зоны. В этом случае экструдер продолжит работу за счет уплотнения смеси в компрессионном кольце. По формуле 12 рассчитаем коэффициент увеличения плотности, который покажет во сколько раз можно увеличить шаг транспортной зоны по сравнению с шагом остального шнека.

$$C_\rho = \frac{r_0^2 - r_1^2}{r_0^2 - r_2^2} \quad (12)$$

где  $r_2$  – конечный радиус компрессионного кольца.

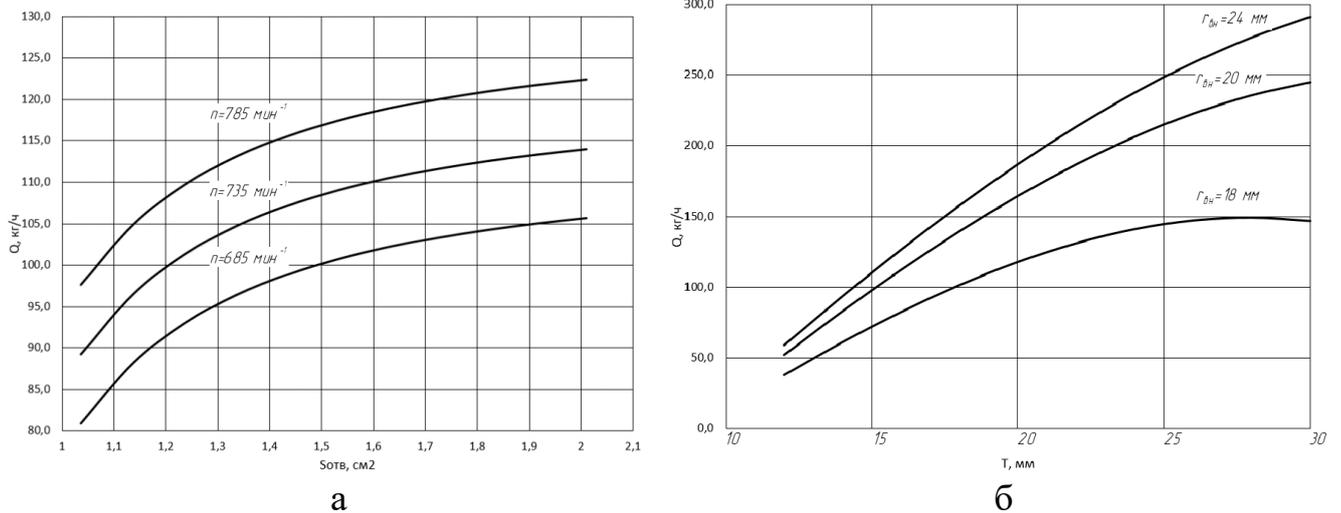
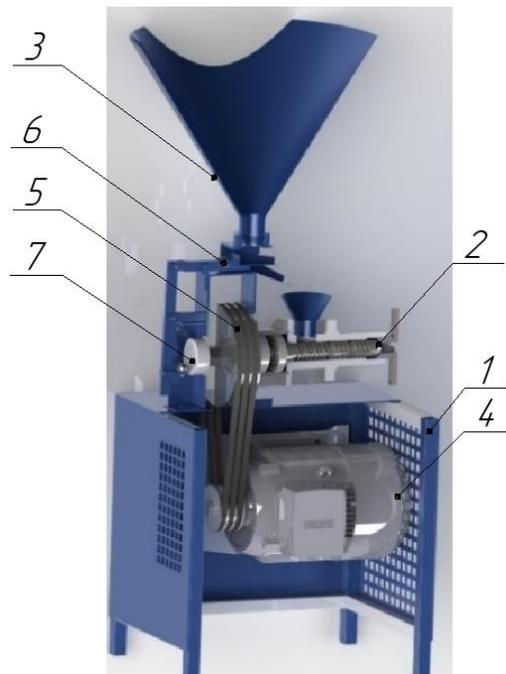


Рисунок 9 – Зависимость изменения производительности от конструктивных и технологических параметров экструдера.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований процесса экструдирования» изложена программа экспериментальных исследований, описана экспериментальная установка, приведены методики проведения и обработки результатов экспериментальных исследований.

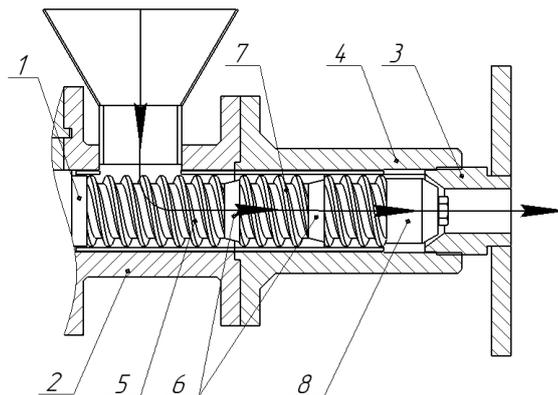
Установка рисунок 10 состоит из рамы 1 на которой установлены рабочий орган экструдера 2 с бункером 3. Привод рабочих органов осуществляется от электродвигателя 4 через клиноременную передачу 5. Для дозирования смеси из бункера в рабочую часть экструдера в конструкции был применен дозатор 6, работающий за счет возвратно-поступательного движения подающего лотка. Частота колебаний дозатора зависит от скорости вращения вала экструдера за счет передачи усилия на толкатель дозатора через эксцентричный ролик 7. Регулирование подачи сапропелезерновой смеси в рабочий орган экструдера осуществляется за счет изменения площади проходного сечения отверстия, соединяющего бункер и дозатор, которое регулируется поворотом бункера.

На рисунке 11 показана рабочая часть экструдера, которая состоит из вращающихся от электродвигателя деталей: вал экструдера 1, подающий шнек 5, конические компрессионные кольца 6, шнек зоны нагрева 7, шнек зоны прессования 8, и неподвижных деталей: корпус зоны питания 2, гайка фильера 3, корпус зоны экструдирования 4. Экструдирование осуществляется следующим образом: смесь из бункера дозированно подается на подающий шнек 5, откуда транспортируется до первого компрессионного кольца 6. В процессе движения корм за счет сил трения разогревается, измельчается и сжимается. Компрессионное кольцо в данной конструкции обеспечивает сужение зазора между вращающимися и неподвижными элементами рабочей части экструдера, что обеспечивает увеличение давления, оказываемого на перерабатываемую смесь, улучшая ее переработку. Аналогично перерабатываемый материал проходит через второе компрессионное кольцо 6, шнек 7 и 8. Затем смесь подходит к фильере 3, откуда через регулируемый зазор покидает экструдер. Благодаря возможности регулировки зазора между фильерой 3 и шнеком 8 изменяется давление, оказываемое на смесь внутри машины.



1 – рама экструдера; 2 – рабочий орган экструдера; 3 – бункер; 4 – электродвигатель; 5 – клиноременная передача; 6 – дозатор экструдера; 7 – эксцентричный ролик дозатора.

Рисунок 10. Экспериментальная установка



1 – вал экструдера; 2 – корпус зоны питания; 3 – гайка фильера; 4 – корпус зоны экструдирования. 5 – подающий шнек; 6 – конические компрессионные кольца; 7 – шнек зоны нагрева; 8 – шнек зоны прессования.

Рисунок 11 – Конструктивная схема рабочей части экструдера

При планировании многофакторных экспериментов были приняты трехуровневые, ротатбельные планы второго порядка Бокса – Бенкина, как более рациональные по числу опытов и позволяющие получить минимальную дисперсию коэффициентов регрессии математических моделей и независимые оценки этих коэффициентов.

**В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований процесса экструдирования корма в экструдере»** приведены результаты эксперимента по экструдированию корма и его влияния на рост и развитие птицы.

Используя теоретическое исследование и проведенные поисковые опыты определили три основных параметра, влияющих на работу экструдера для производства сапропелезерного корма:

- Частота вращения рабочих органов экструдера;
- Длина компрессионных колец экструдера;
- Шаг шнека транспортной зоны экструдера.

Частота вращения рабочих органов экструдера – это фактор, от изменения которого будет зависеть согласно формуле 9 производительность экструдера и согласно формуле 8 мощность, затрачиваемая на процесс экструдирования. Диапазон частоты вращения 685...785 мин<sup>-1</sup> выбирали исходя из обеспечения производительности экструдера в пределах 90...150 кг/ч по графикам 9 при шаге шнека транспортной зоны  $T=20...28$  мм; и радиусе  $r_{вн1} = 18$  мм.. При этом площадь проходного сечения  $S_{отв} = 1.2$  см<sup>2</sup>, которая тоже влияет на производительность задавали исходя из графиков 8 для обеспечения оптимальной температуры обработки смеси.

Длина компрессионных колец экструдера – это фактор который в наибольшей степени влияет на температуру обработки смеси согласно формуле 5. Данный фактор согласно формуле 8 влияет и на мощность, затрачиваемую на процесс экструдирования и соответственно влияет также и на удельный расход энергии. На производительность данный фактор влияет меньше согласно формуле 9 за счет изменения давления перед компрессионными кольцами, и соответственно изменения рециркуляции сапропелезерновой смеси в экструдере.

Изменяя длину компрессионных колец можно получить необходимую температуру обработки смеси. Согласно графикам 8 необходимый температурный режим обеспечивается при длине кольца 4...12 мм.

На производительность согласно теоретическим зависимостям, выведенным во 2-й главе существенное значение, оказывает частота вращения шнека экструдера и шаг транспортной зоны экструдера. Причем согласно зависимости 12 шаг шнека транспортной зоны можно увеличить в 1.4 раза, при этом экструдер будет работать без забивания, а температура обработки смеси практически не измениться. Для проведения эксперимента были изготовлены насадки на вал шнека с шагом 18 мм, 24 мм, 28мм.

Для оценки технологического процесса экструдирования сапропелезерновой смеси выбрали следующие выходные величины:

- Производительность экструдера;
- Мощность, затрачиваемая на процесс экструзии;
- Температура обработки корма.

В результате многофакторного регрессионного анализа установлена зависимость температуры  $T$ , °С от частоты вращения вала экструдера  $n$ , мин<sup>-1</sup> ( $b_1$ ); длины компрессионных колец  $h$ , мм( $b_2$ ); шага шнека транспортной зоны  $t$ , мм. ( $b_3$ ):

$$T = -243,03 + 0,96 \cdot b_1 + 1,63 \cdot b_2 - 0,02 \cdot b_3 - 0,04 \cdot b_2 \cdot b_3 - + 0,07 \cdot b_2^2 \quad (13)$$

На рисунке 12 показана поверхность отклика, зависимости температуры от шага шнека транспортной зоны и длины компрессионного кольца. Анализируя поверхность отклика установлено, что наиболее благоприятный температурный режим 120...140 °С для обработки сапропелезернового корма достигается с компрессионными кольцами длиной от 7 до 12 мм при шаге шнека транспортной зоны 20 мм а при увеличении шага шнека транспортной зоны до 28мм такой

температурный режим достигается при длине компрессионных колец от 9 до 12 мм. Частота вращения практически не оказывает влияние на температурный режим обработки смеси. На поверхности отклика видно, что наибольшее влияние на температуру обработки смеси оказывает длина компрессионного кольца. Увеличение длины компрессионного кольца увеличивает температуру обработки смеси. Увеличение шага шнека приводит к незначительному уменьшению температуры обработки.

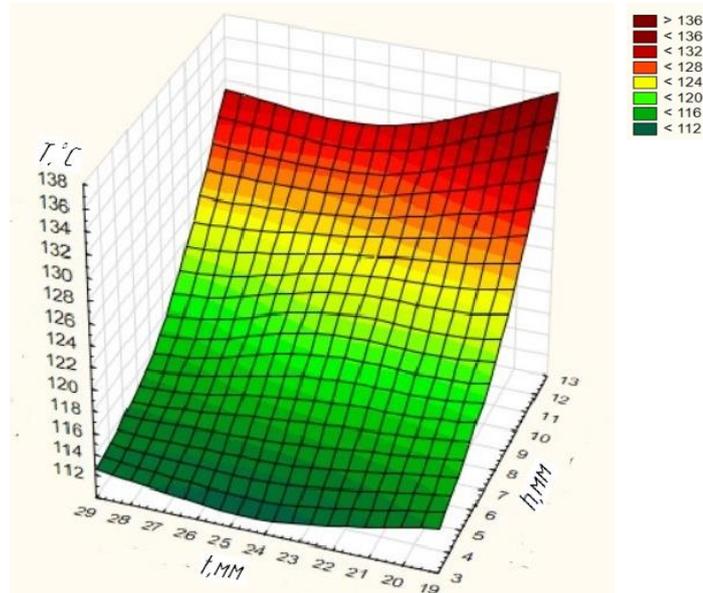


Рисунок 12 – Зависимость температуры обработки смеси от шага шнека транспортной зоны и длины компрессионного кольца

В результате эксперимента установлена также зависимость производительности  $Q$ , кг/ч от частоты вращения вала экструдера  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$  ( $b_1$ ); длины компрессионных колец  $h$ , мм ( $b_2$ ); шага шнека транспортной зоны  $t$ , мм. ( $b_3$ ):

$$Q = -144,02 - 0,33 \cdot b_1 + 14,54 \cdot b_2 + 18,43 \cdot b_3 + 0,02 \cdot b_1 \cdot b_3 - 0,73 \cdot b_2 \cdot b_3 + 0,20 b_2^2 - 0,48 \cdot b_3^2 \quad (14)$$

На рисунке 13 показана поверхность отклика, зависимости производительности экструдера от частоты вращения вала и шага шнека транспортной зоны. Анализируя поверхность отклика, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на производительности экструдера оказывает шаг шнека и частота вращения. Увеличение длины компрессионного кольца незначительно уменьшает производительность экструдера за счет увеличения противотока обрабатываемого материала. Увеличение шага шнека приводит к увеличению производительности. Увеличение частоты вращения вала экструдера увеличивает производительность экструдера. В проведенном эксперименте производительность экструдера при которой обеспечивается необходимый температурный режим изменяется от 100 кг/ч до 135 кг/ч. Максимальная производительность  $Q=135$  кг/ч при оптимальном температурном режиме обработки смеси достигается при следующих конструктивных и технологических параметрах экструдера: частоте вращения вала  $n=735$   $\text{мин}^{-1}$ ; длине компрессионных колец  $l=8$  мм; шаге шнека транспортной зоны  $T=24$  мм.

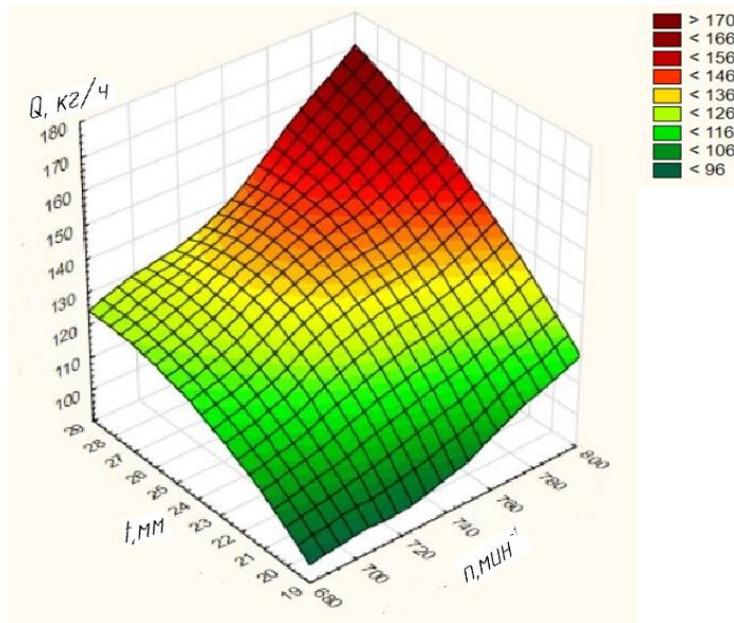


Рисунок 13 – Зависимость производительности экструдера от частоты вращения вала и шага шнека транспортной зоны

В результате эксперимента установлена также зависимость мощности, затрачиваемой на процесс экструдирования  $N$ , кВт от частоты вращения вала экструдера  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$  ( $b_1$ ); длины компрессионных колец  $h$ , мм ( $b_2$ ); шага шнека транспортной зоны  $t$ , мм. ( $b_3$ ):

$$N = 3,35687 - 0,01 \cdot b_1 + 0,02 \cdot b_2 - 0,05 \cdot b_3 + 0,01 \cdot b_2^2 + 0,01 \cdot b_3^2 \quad (15)$$

На рисунке 14 показана поверхность отклика, зависимости мощности, затрачиваемой на процесс экструдирования экструдера от шага шнека транспортной зоны и длины компрессионного кольца.

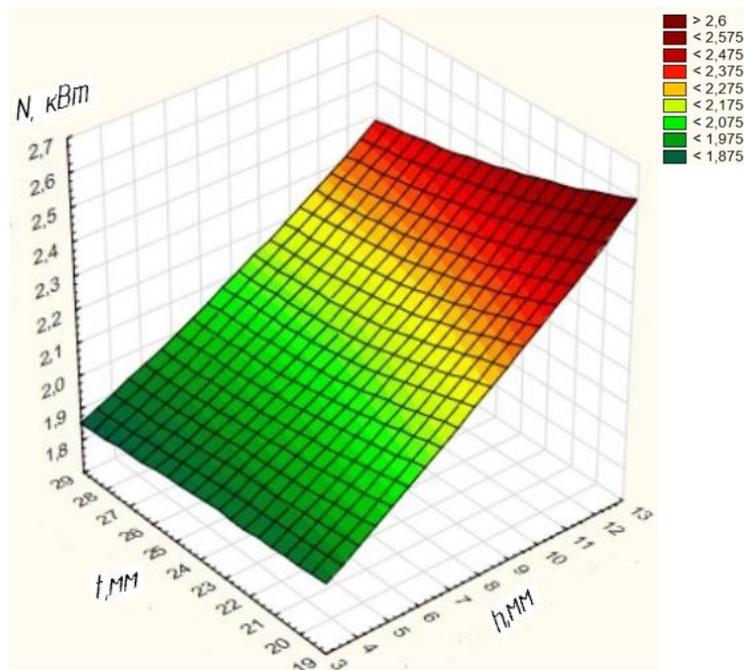


Рисунок 14 – Зависимость мощности, затрачиваемой на процесс экструдирования от шага шнека транспортной зоны и длины компрессионного кольца

Анализируя поверхность отклика, можно сделать вывод, что на мощность, затрачиваемую на экструдирование оказывают влияние все три изменяемых

фактора. Увеличение длины компрессионного кольца увеличивает затрачиваемую мощность. Увеличение шага шнека приводит к незначительному уменьшению затрачиваемой мощности за счет уменьшения температуры обработки смеси. При увеличении частоты вращения вала экструдера затрачиваемая мощность увеличивается. В проведенном эксперименте потребляемая мощность на экструдирование при оптимальном температурном диапазоне изменяется от 1.9 кВт до 2.53 кВт.

Для определения температуры, при которой обеспечивается наилучшее качество корма был проведен химический анализ экструдата полученного при температуре обработки от 100 °С до 140 °С. В результате (рис.15) определено, что при температуре обработки 120 °С корм имеет наибольшую обменную энергию. Химический анализ установил, что при данной температуре обменная энергия для свиней составляет 10,8 Мдж/кг, для КРС 10,7 Мдж/кг для птицы 11,9 Мдж/кг. Также отмечено, что при температуре 120 °С наблюдается снижение плохо усвояемого крахмала с 44,2% до 39,7% за счет перехода в легкоусвояемый сахар содержание в корме которого увеличилось с 2,3% до 6,5 %.

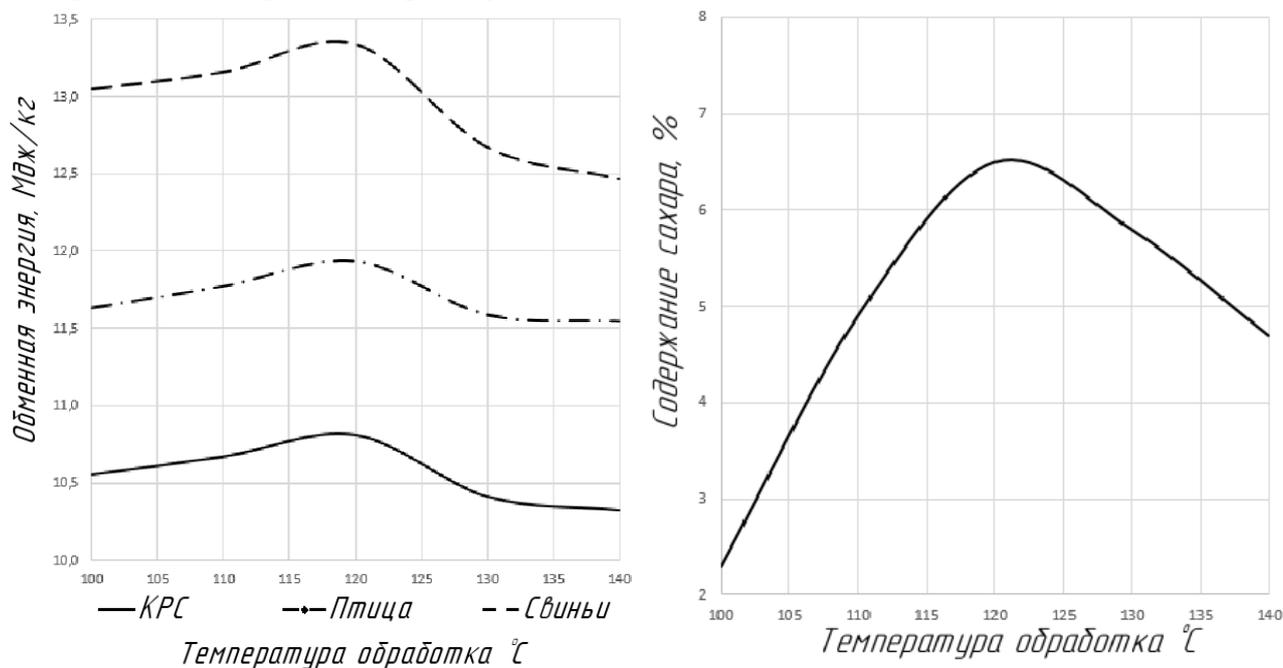


Рисунок 15 – Зависимость качества корма от температуры обработки

Установлено что наиболее рациональные параметры работы экструдера при которых отмечается наилучшее качество корма и наименьшие энергозатраты 19.4 кВт\*ч/т на единицу обработанного корма, наблюдались при частоте вращения вала  $n=785 \text{ мин}^{-1}$ ; длине компрессионных колец  $l=8 \text{ мм}$ ; шаге шнека транспортной зоны  $T=20 \text{ мм}$ , при этом  $Q=121.4 \text{ кг/ч}$ ;  $N=2.34 \text{ кВт}$ ;  $T=120.9 \text{ °C}$

Проведенные исследования пресс-экструдера показали соответствие теоретических зависимостей (11, 15) температуры обработки смеси от длины компрессионного кольца, производительности экструдера от шага шнека транспортной зоны с экспериментальными данными (рис.16).

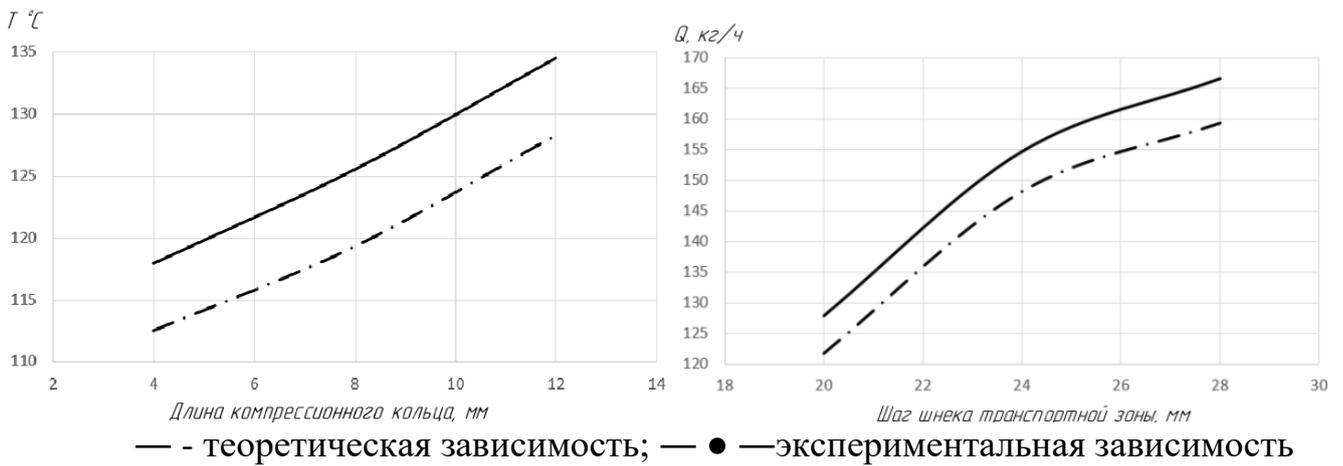
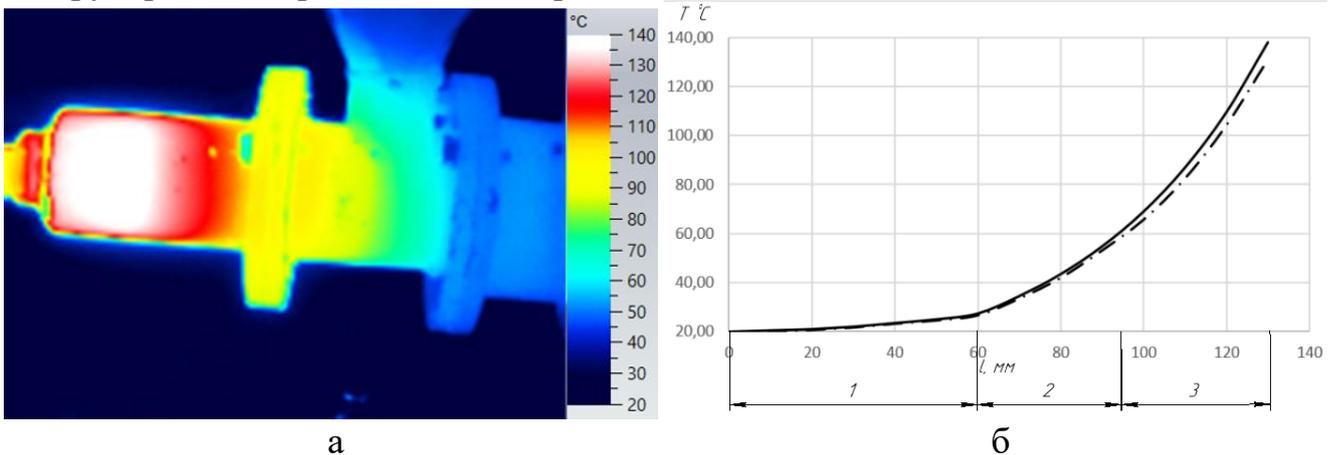


Рисунок 16 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Для анализа изменения температуры по длине шнека использовали тепловизор. На рисунке 17а термограмма рабочей части экструдера сделанная при его работе. На термограмме отражены данные о температуре в каждой точке экструдера. Используя данную термограмму был построен график изменения температуры по длине шнека (рис. 17 б). Анализ изменения температуры по длине шнека в зоне 1 загрузки и транспортировки смеси, в зоне 2 уплотнения, в зоне 3 течения показывают соответствие теоретических данных с экспериментальными в установленных пределах. Анализируя данный график, видно, что основной нагрев идет во 2-й и 3-й зоне. Во второй зоне происходит нагревание смеси на 33 °С, в третьей на 72 °С, в первой на 6 °С. Нагревание смеси в первой зоне происходит менее интенсивно т.к. давление в этой зоне еще небольшое и соответственно сила трения смеси о шнек экструдера будет небольшой. С ростом давления в экструдере растет и температура обработки смеси.

Основываясь на данных, полученных с помощью тепловизора можно сделать вывод, что теоретические предположения о влиянии на температуру давления в экструдере подтверждаются экспериментально.



— - теоретическая зависимость; — ● —экспериментальная зависимость

Рисунок 17 – Изменение температуры по длине шнека экструдера

При исследовании влияния сапропелезернового экструдированного корма на рост и развитие цыплят-бройлеров при замене 10% полнорационного комбикорма экструдированной пшеницы с сапропелем с соотношением компонентов 9:1 (опытная группа 1) и 7 % - экструдированной пшеницы (опытная группа 2),

контрольная группа в течении всего научно-хозяйственного опыта получала только полнорационный комбикорм.

Установлено, что недельный привес 555 г. наблюдался у птицы, получающей экструдированный сапропелезерновой корм и птица, имела на 44,46-80,32 г больше живого веса чем птица получающая только полнорационный корм. Установлено, что экструдированная пшеница улучшает биохимическую ценность и органолептические качества, а в совокупности с сапропелем вносит в рацион дополнительное количество биологически активных компонентов, минеральных веществ и витаминов. На рисунке 18 приведен график изменения живой массы птицы без учета пола в контрольной и опытной группе 1

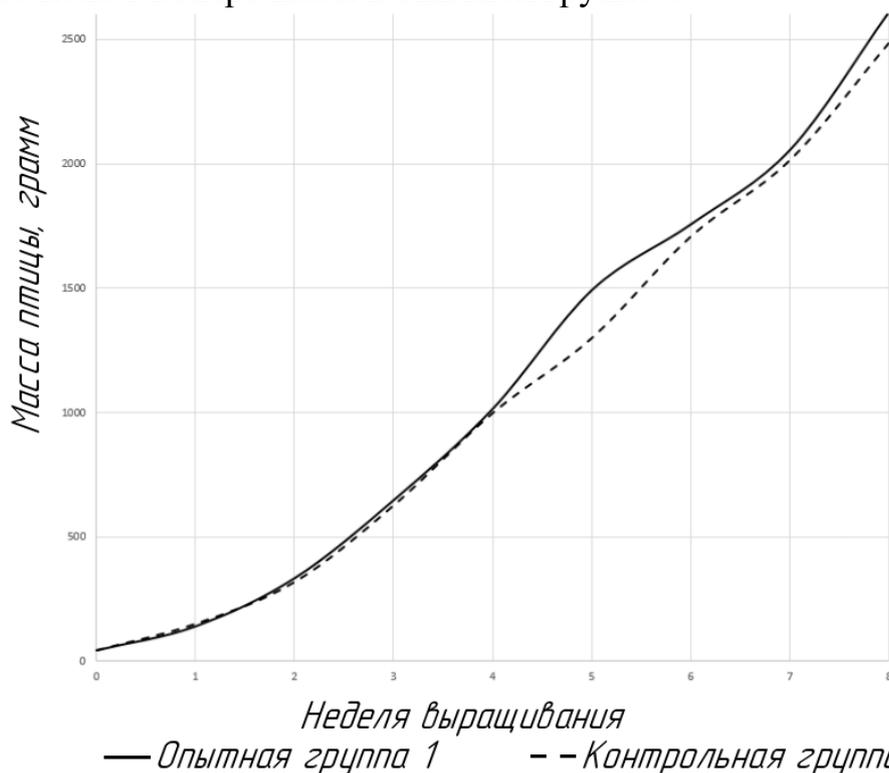


Рисунок 18 – Динамика роста цыплят-бройлеров без учета пола

Проведенный научно-хозяйственный опыт открывает перспективы для использования экструдированной пшеницы с сапропелем в качестве кормового средства, заменяющего 6% полнорационного комбикорма при откорме цыплят-бройлеров.

**В пятой главе** «Технико-экономическая эффективность производства экструдированных кормов» приведены расчеты экономической эффективности от применения разработанной конструкции экструдера.

Установлено, что разработанный пресс-экструдер сапропелезернового корма показал хорошую эффективность, за счет снижения энергозатрат на 11 %, сокращения времени обработки одной тонны корма на 1 час и повышения качества корма.

Расчет показателей экономической эффективности предложенного решения показал экономическую целесообразность применения разработанного пресс-экструдера. Годовой экономический эффект от внедрения экструдера составил 114 245 рублей, при сроке окупаемости – 0,53 года.

### Заключение

1. Для повышения продуктивности животных целесообразно при производстве кормов использовать сапропель, который оказывает положительное влияние на рост и развитие животных и для экструдирования сапропелезерновой смеси рекомендуется использовать экструдер с двухзаходным шнеком и коническими компрессионными кольцами.

2. Для обоснования конструктивных и технологических параметров экструдера целесообразно использовать разработанные математические модели экструдирования сапропелезерновой смеси, позволяющие определить изменение давления в разных частях шнека (1; 3; 5; 6), температуру обработки смеси (7), производительность (11), мощность, затрачиваемую на процесс экструдирования (10). Для повышения эффективности экструдирования сапропелезерновой смеси целесообразно использовать конические компрессионные кольца с начальным радиусом  $r_1 = 14$  мм, конечным радиусом  $r_2 = 16$  и двухзаходный шнек с радиусом  $r_{вн1} = 18$  мм, высотой зуба  $h_{в1} = 4$  мм.

3. По результатам экспериментальных исследования получены математические модели для определения температуры обработки смеси (13), производительности экструдера (14) и мощности, затрачиваемой на процесс экструдирования (15). Установлено что наиболее рациональные параметры экструдера при которых обеспечивается необходимая температура обработки смеси, наилучшее качество корма и наименьшие энергозатраты наблюдали при: частоте вращения вала  $n=785$  мин<sup>-1</sup>; длине компрессионных колец  $l=8$  мм; шаге шнека транспортной зоны  $T=20$  мм, при этом  $Q=121$  кг/ч;  $N=2.34$  кВт;  $T=121$  °С. Установлено, что интенсивность нагревания смеси зависит от давления и распределяется по зонам следующим образом: в первой зоне низкая интенсивность нагревания, во второй и третьей интенсивность значительно растет. В первой зоне происходит нагревание смеси на 6 °С, во второй на 33 °С, в третьей на 72 °С. Что подтверждает теоретическое предположение о влиянии этого показателя на рост температуры. Экспериментальные исследования по влиянию конструктивных и технологических параметров экструдера на процессы, происходящие в рабочих органах подтвердили закономерность выведенных теоретических зависимостей для определения температуры обработки смеси (7), производительности экструдера (11) и мощности, затрачиваемой на процесс экструдирования (10).

4. По результатам научно-хозяйственного опыта, проведенного на цыплятах-бройлерах, установлено что недельный привес 555 г. наблюдался у птицы, получающей экструдированный сапропелезерновой корм и птица, имела на 123 г больше живого веса чем птица получающая только полнорационный корм.

5. Разработанный экструдер показал высокую эффективность, за счет снижения энергозатрат до 19.4 кВт\*ч/т, сокращения времени обработки одной тонны кормов на 1 час и повышения качества корма. Расчет показателей экономической эффективности предложенного решения показал экономическую целесообразность применения разработанного пресс-экструдера. Годовой экономический эффект от внедрения экструдера составил 114 245 рублей, при сроке окупаемости – 0,53 года.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:****Публикации в международных изданиях базы Scopus**

1. Богданов, К.А. The influence of design parameters on the pressure in the extruder for the production of spropelic feed / Morozov V. V. Bogdanov K. A. Ignatenkov V. G. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. 2021. Sci. 659. 012049.

2. Богданов, К.А. Rationale for the design and technological parameters of the extruder for the production of spropel and grain feed / Morozov V. V. Bogdanov K. A. Smelik V. A. Volkhonov M. S. Kukhar V. S. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. 2021. Sci. 699. 012062.

**Публикации в рецензируемых изданиях ВАК**

3. Богданов, К.А. Теоретическое исследование изменения давления в экструдере для производства кормов с добавлением сапропеля / Морозов В.В. Богданов К.А. Игнатенков В.Г. // Вестник Курганской ГСХА. - 2020. № 2 (34). - С.75-78

4. Богданов, К.А. Результаты экспериментальных исследований экструдера для производства сапропелезернового корма / Морозов В.В. Богданов К.А. Игнатенков В.Г. Фомичев М.А. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2020. № 9 (191). - С.134-140.

5. Богданов, К.А. Теоретическое исследование конструктивных и технологических параметров в экструдере для производства кормов с добавлением сапропеля / Богданов К.А. // Вестник Курганской ГСХА. - 2021. № 2 (38). - С.50-54

**Публикации в прочих научных изданиях**

6. Богданов, К.А. Обоснование конструкции экструдера для производства кормов с добавлением сапропеля / Морозов В.В. Богданов К.А. Игнатенков В.Г. Мохнаткин В.Г.// Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: сб. докл. XV Международной научно-практической конференции молодых ученых. Великие Луки. -2020. - С. 131-137.

7. Богданов, К.А. Обоснование конструкции шнека и компрессионных колец экструдера для производства кормов с добавлением сапропеля / Морозов В.В. Богданов К.А. Игнатенков В.Г. // Научное обеспечение инновационного развития АПК сб. докл. Международной научно-практической конференции. Великие Луки 2020. – С. 198-204.

8. Богданов, К.А. Технология работ и комплекс машин для поточного производства и приготовления витаминно-кормовых добавок на основе сапропеля / Морозов В.В. Игнатенков В.Г. Лаппо Е.Л. Шлапаков В.В. Богданов К.А. // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: сб. докл. XIV Международной научно-практической конференции молодых ученых. Великие Луки. - 2019. - С. 256-266.

---

Лицензия 90ЛЮ1 № 0008747 Подписано к печати 02.09.2021 г.  
Формат 60 х 90/16  
Усл. печ. л. 1,5 Тираж 100 экз.  
Заказ 36  
Редакционно-издательский отдел, ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА  
182112, г. Великие Луки, пр-т Ленина, 2