

На правах рукописи



**СИЗИКОВ Константин Анатольевич**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОУСВОЯЕМЫХ  
КОМБИКОРМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЗАЩИЩЕННОГО БЕЛКА  
ДЛЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА**

Специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств» и 05.18.01 – «Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)

Научные руководители – доктор технических наук, профессор  
**Афанасьев Валерий Андреевич**;  
доктор технических наук, доцент  
**Фролова Лариса Николаевна**

Официальные оппоненты – **Панин Иван Григорьевич**  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
(ООО «Авита»); генеральный директор  
**Ситников Николай Юрьевич**  
кандидат технических наук  
(ГК «Русмит»); директор по комбикормовому  
производству

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж

Защита состоится «25» июня 2021 г. в 13<sup>00</sup>ч. на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес совета университета.

Автореферат размещен в сети Интернет на официальных сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «24» апреля 2021 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ».

Автореферат разослан «12» мая 2021 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01  
профессор

А.В. Дранников



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последние годы динамично развивалась комбикормовая промышленность, объем производства комбикормов в которой в 2020 г. превысил 30 млн т. Внутреннее потребление зерна в России составляет около 80 млн т. в год, из них на корм скоту идет 55-60 %. Из-за отсутствия оптимальной структуры, низкого качества фуражного зерна, недостатка белка и энергии на производство животноводческой продукции затрачивается в 1,2-1,5 раза большее количество кормов. Серьезной проблемой, сдерживающей развитие животноводства, является несбалансированность кормов. Для наращивания производства продукции животноводства, повышения его рентабельности и снижения зависимости от импортных поставок весьма важной и своевременной представляется разработка технологий, направленных на обеспечение производства высокоусвояемых комбикормов с научно обоснованным содержанием кормовых добавок. Проблема разработки высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота обусловлена спецификой желудочного тракта коров и особенностями усвоения белка. Повысить продуктивность и сохранить здоровье крупного рогатого скота можно, только увеличив в сыром протеине долю защищенного протеина. Защищенный белок – это белок, устойчивый к воздействию ферментов микрофлоры и неспособный к распаду на составляющие – аммиак и углеродную цепочку. Использование влаготепловой и баротермомеханической обработки зерновых и зернобобовых культур позволяет поучить комбикорма с защищенным белком.

Сдерживающими факторами в применении высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка для крупного рогатого скота являются отсутствие научного обоснования их применения для повышения усвояемости и поедаемости комбикормов. В связи с этим весьма актуально обоснование выбора высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка для крупного рогатого скота, изучение основных кинетических закономерностей процесса экструзии зерновых культур при температурах начала реакции Майяра, а также необходима

разработка новых видов экструдеров.

Теоретические основы технологии высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка для крупного рогатого скота отражены в работах Харитонов Е.Л., Трухачева В.И., Погосьяна Д.Г., Ляшенко В.В., Виновски Т., Головина А.В., Эбзеева М.М., Фаттахова З.Ф., Скурихина В.Н., Wang, C., Liu, J.X. и др.

Работа проводилась в соответствии с планом госбюджетной НИР кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающих производств ФБГОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

**Цель диссертационной работы** – развитие научно-практических основ процессов производства высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка; разработка рекомендаций по проектированию и внедрению в производство высокоэффективных видов оборудования; разработка перспективной технологии, направленной на повышение питательной ценности, усвояемости, поедаемости и доброкачественности комбикормов для крупного рогатого скота.

В соответствии с целью решались **следующие задачи**:

- научное обоснование рациона с защищенным белком для крупного рогатого скота для повышения питательной ценности, усвояемости, поедаемости и доброкачественности комбикормов;
- исследование кинетических закономерностей процесса экструдирования зерновых и зернобобовых компонентов комбикорма с обоснованием рациональных параметров процесса экструдирования;
- математическое моделирование процесса экструдирования зерновых и зернобобовых компонентов комбикормов;
- разработка конструкции экструдера, реализующего режим, обеспечивающий получение защищенного белка;
- разработка технологии производства экструдированных зерновых и зернобобовых культур с защищенным белком для крупного рогатого скота, комплексной технологической линии производства высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом для крупного рогатого скота, разработка нормативно-технической документации;

– проведение испытаний разработанных видов высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом для крупного рогатого скота для определения эффективности их потребления, внедрение разработанных технологии и оборудования.

**Научная новизна.** Разработан концептуальный подход в создании новых видов высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка для крупного рогатого скота, направленных на повышение усвояемости, поедаемости и доброкачественности комбикормов.

Выявлены основные кинетические закономерности процесса экструдирования зерновых и зернобобовых компонентов комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом для крупного рогатого скота.

Получена математическая модель процесса экструдирования зерновых и зернобобовых компонентов комбикормов с защищенным белком, позволяющая рассчитать характер изменения температуры и давления по длине рабочей камеры экструдера со ступенчатой их стабилизацией, необходимой для протекания физико-химических изменений основных компонентов продуктов.

Установлен характер влияния экструдированных зерновых и зернобобовых компонентов комбикормов с защищенным белком на усвояемость, поедаемость и доброкачественность разработанных видов высокоусвояемых комбикормов.

**Практическая ценность.** Определены и обоснованы рациональные технологические режимы процесса экструдирования зерновых и зернобобовых компонентов комбикормов с защищенным белком при производстве высокоусвояемых комбикормов для крупного рогатого скота.

Получены рецепты высокоусвояемых комбикормов с использованием экструдированных зерновых и зернобобовых культур с защищенным белком, обладающих высокой биологической и энергетической ценностью, со сбалансированными по питательной ценности компонентами, способствующих росту привесов, сокращению сроков откорма и снижению затрат корма.

Разработана конструкция экструдера для производства высокоусвояемых комбикормов с использованием

экструдированных зерновых и зернобобовых культур с защищенным белком.

Разработана новая технология производства высокоусвояемых комбикормов с использованием экструдированных зерновых и зернобобовых культур с защищенным белком. На основе экспериментальных исследований разработан стандарт организации СТО 9296-540-02068108-2021 (технические условия) «Высокоусвояемые комбикорма с защищенным белком для крупного рогатого скота». Разработана комплексная технологическая линия производства высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом для крупного рогатого скота.

Достоверность научных разработок подтверждена промышленным производством партии высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом для крупного рогатого скота на ОАО «Богдановичский комбикормовый завод» (Свердловская обл., г. Богданович), проведены производственные испытания по определению распадаемости и переваримости кормовых добавок во Всероссийском научно-исследовательском институте физиологии, биохимии и питания животных филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста» (ВНИИФБиП), а также проведен производственный контроль белковых компонентов в ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук». Имеется акт внедрения конструкции экструдера АО «НПЦ «ВНИИКП», г. Воронеж.

**Положения, выносимые на защиту:**

– рецептуры высокоусвояемых комбикормов с использованием экструдированных зерновых и зернобобовых компонентов с защищенным белком для крупного рогатого скота, обладающих высокой биологической и энергетической ценностью, сбалансированными по питательной ценности компонентами, способствующих росту надоев, сокращению сроков откорма и снижению затрат корма;

– выявленные кинетические закономерности процесса экс-

трудирования зерновых и зернобобовых компонентов комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота; эффективность и обоснование выбора рациональных параметров процесса экструдирования с использованием плавного, постепенного возрастания температуры и давления со ступенчатой их стабилизацией, необходимой для протекания физико-химических изменений основных компонентов продуктов;

– математическая модель процесса экструдирования зерновых и зернобобовых компонентов комбикормов с защищенным белком, позволяющая рассчитать характер изменения температуры и давления по длине рабочей камеры экструдера со ступенчатой их стабилизацией, необходимой для протекания физико-химических изменений основных компонентов продуктов;

– эффективность использования высокоусвояемых комбикормов с использованием экструдированных зерновых и зернобобовых культур с защищенным белком для крупного рогатого скота;

– технология производства высокоусвояемых комбикормов с использованием экструдированных зерновых и зернобобовых культур с защищенным белком для крупного рогатого скота.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях (Воронеж, 2020, 2021), (Казань, 2020). Результаты работы демонстрировались на V Международной выставке изобретений и инноваций имени Н.Г. Славянова, на IX Агропромышленном конгрессе; по итогам которых работа награждена медалью и дипломами.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 1 монография, 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 5 патентов РФ и 4 тезиса докладов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 202 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 59 таблиц. Список литературы включает 178 наименований, в том числе 40 на иностранных языках. Приложения к диссертации представлены на 19 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе** дана краткая характеристика процесса экструзии, используемого в кормопроизводстве, систематизированы литературные данные о современном состоянии технологий по производству высокоусвояемых комбикормов с использованием экструдированных зерновых и зернобобовых культур с защищенным белком для крупного рогатого скота, приведен обзор конструкций экструдеров, а также анализ математических моделей процесса экструдирования. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы и определены методы их решения.

**Во второй главе** приведено исследование процесса предварительной влаготепловой обработке зерна. Влаготепловая обработка зерновых и зернобобовых культур заключалась в увлажнении комбикорма до 17-20 % в нагреве до 70-80 °С паром давлением 0,6 МПа и передаче подготовленного комбикорма на кондиционер.

Исследование влияния предварительного пропаривания зерна на деструкцию крахмала показало, что обработка зерна паром незначительно влияет на состояние крахмала (таблица 1) Так, пропаривание зерна пшеницы и кукурузы в течение 4 мин. увеличивает перевариваемость крахмала на 0,1-0,3 мг/г, а в течение 10 мин. – на 0,5-0,7 мг/г по сравнению с их содержанием в исходном зерне.

Установлено, что декстринизация и перевариваемость крахмала с увеличением влажности зерна до 18 % растет интенсивно. Например, в экструдированной кукурузе степень декстринизации и перевариваемость крахмала при данном значении влаги достигала 65 % и 140 мг/г, в зерносмеси – 45 % и 108 мг/г, в пшенице – 32 % и 90 мг/г соответственно (рисунок 1).

Т а б л и ц а 1 – Изменение перевариваемости крахмала (in vitro) зерна от продолжительности пропаривания

Продолжительность пропаривания, мин	Влажность зерна, %		Перевариваемость крахмала (in vitro), мг глюкозы на 1 г продукта	
	Кукуруза	Пшеница	Кукуруза	Пшеница
0	13,3	12,3	21,2	12,4
2	13,8	13,7	21,0	12,5
4	14,7	14,6	21,3	12,7
6	15,6	15,3	21,6	12,7
8	16,0	16,7	21,9	12,9
10	16,8	18,3	22,4	13,0
12	17,7	20,1	23,1	13,3
14	18,8	21,8	23,3	13,2
16	19,4	24,6	23,5	13,4

При температуре зерна кукурузы 100 °С перевариваемость крахмала в экструдате составляла 60 мг/г глюкозы, при температуре кукурузы 120-130 °С (рисунок 2) этот показатель достигал 140 мг/г, что на 40-42 % выше, чем в зерне с исходной влажностью.

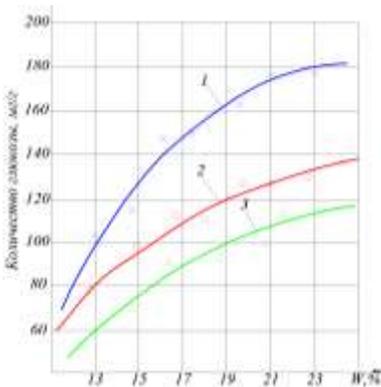


Рисунок 1 – Влияние влажности зерна на изменение перевариваемости крахмала (in vitro) при экструдировании: 1 – увлажненная кукуруза ( $W = 17,6\%$ ); 2 – увлажненная зерносмесь ( $W = 17,8\%$ ); 3 – увлажненная пшеница ( $W = 18,3\%$ )

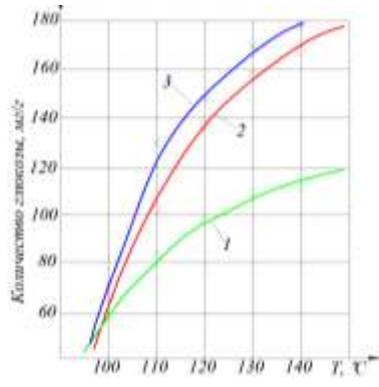


Рисунок 2 – Влияние температуры нагрева экструдированной кукурузы на изменение перевариваемости крахмала (in vitro) при влажности: 1 –  $W = 12,8\%$ ; 2 –  $W = 17,8\%$  (увлажненная); 3 –  $W = 18,3\%$  (пропаренная)



Экструдирование пропаренного зерна интенсифицирует процесс деструкции крахмала. Если в экструдате из пшеницы и кукурузы с исходной влажностью 12-13 % перевариваемость крахмала составляла 60-70 и 90-110 мг/г, то в экструдате, полученном из зерна, прошедшего предварительное пропаривание до влажности 18 %, данный показатель увеличился до 100 и 160 мг/г, т. е. на 50-60 % (рисунок 4). Для пшеницы эти показатели соответственно равны 140-145 °С и 380-390 кг/ч, для зерносмеси 135-140 °С и 430-435 кг/ч. Исследование влияния крупности размола зерна на изменение качества готового экструдированного продукта показало (рисунок 5), что чем меньше диаметр отверстий сита дробилки, тем перевариваемость крахмала выше.

Сопоставляя показатели изменения качества и энергетические показатели дробилки и экструдера, пришли к выводу, что наиболее оптимальный размер отверстий сита дробилки, на котором измельчается зерно, – 3,0 мм.

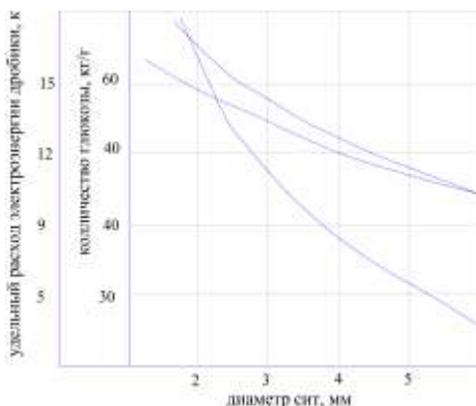


Рисунок 5 – Влияние величины диаметра отверстий сита дробилки на перевариваемость крахмала (in vitro) и удельный расход электроэнергии дробилки и экструдера при экструдировании кукурузы: 1 – изменение переваримости крахмала (in vitro); 2 – удельный расход электроэнергии дробилки; 3 – удельный расход электроэнергии экструдера

выводу, что они имеют следующие свойства: угол естественного откоса 46-50 град, объемная масса – 0,48-0,51 т/м<sup>3</sup> (таблица 2).

Результаты этих исследований позволили установить, что процесс экструдирования пшеницы исходной влажности стабилизируется при температуре зерна на выходе 150-155 °С, а производительность экструдера составила 330-340 кг/ч.

Анализируя физико-механические свойства рассыпных комбикормов для крупного рогатого скота, пришли к вы-

Т а б л и ц а 2 – Показатели качества рассыпных и экструдированных комбикормов для крупного рогатого скота

Наименование продукта	Влажность	Остатки на ситах, %					Угол естест. откоса, град	Объемная масса, т/м <sup>3</sup>	Содержание, %				Перевариваемость крахмала (in vitro), мг глюкозы на 1 г продукта
		Ø 5	Ø 3	Ø 2	Ø 1	Дно			сырого протеина	жира	клетчатки	Растворимых углеводов	
Рассыпной комбикорм	12,9	-	0,5	16,7	36,8	52,0	51	0,530	21,89	11,11	1,20	7,72	29,3
	10,4	-	0,3	15,2	35,5	49,0	48	0,527	21,62	10,58	1,11	6,58	27,4
	12,1	-	0,3	15,5	34,2	50,0	52	0,545	21,74	10,39	1,22	7,96	28,5
Экструдир. комбикорм в гранулах	8,5	-	-	-	-	-	40	0,340	22,34	10,35	1,15	10,54	65,32
	7,4	-	-	-	-	-	41	0,330	21,18	10,64	1,08	19,13	68,15
	7,9	-	-	-	-	-	40	0,395	21,98	10,60	1,13	11,64	63,85

Т а б л и ц а 3 – Изменение содержания витаминов в ячмене и комбикорме в процессе экструдирования

Продукт	Содержание витаминов							
	В <sub>1</sub> , мг/кг		В <sub>2</sub> , мг/кг		Е, м.е./кг		А, м.е./кг	
	Исход.	Экструд.	Исход.	Экструд.	Исход.	Экструд.	Исход.	Экструд.
Ячмень	4,8	5,0	2,1	2,0	5,7	4,55	-	-
Комбикорм	0,76	0,74	2,9	2,9	45,0	42,7	4800	4530
	0,91	0,90	2,0	2,1	-	-	-	-

При экструдировании комбикормов для крупного рогатого скота важнейшими технологическими факторами, которые обеспечивают наилучшие условия для формирования гранул, являются температура продукта на выходе из шнека экструдера, производительность экструдера, влажность обрабатываемого продукта и нагрузка основного двигателя экструдера. Конструкция головки шнека экструдера позволила получать готовый продукт в виде гранул диаметром 10-13 мм и длиной 20 мм.

Полученные результаты исследований показали, что с увеличением влажности комбикорма производительность экструдера уменьшается (рисунок 6).

Так, при содержании влаги в комбикорме 12-13 % производительность экструдера составляла 350-370 кг/ч, а удельный расход электроэнергии – 53-56 кВт·ч/т, при влажности комбикорма 18 % эти показатели увеличивались до 450 кг/ч и 62-63 кВт·ч/т соответственно. Повышение влажности комбикорма при экструдировании улучшает и качество гранул (рисунок 7).

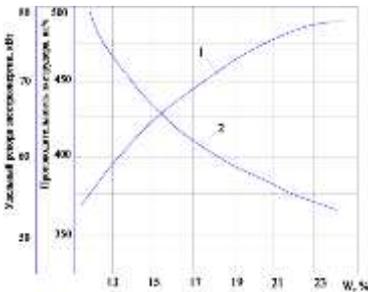


Рисунок 6 – Влияние влажности комбикорма на изменение производительности экструдера и удельного расхода электроэнергии: 1 – производительность экструдера; 2 – удельный расход электроэнергии

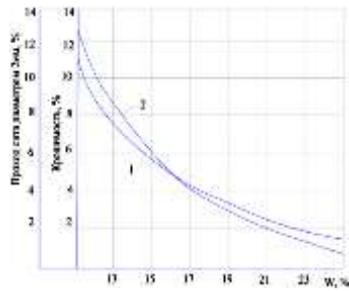


Рисунок 7 – Изменение крошимости гранул и величины прохода сита Ø 2 мм от влажности комбикорма: 1 – крошимость; 2 – проход сита Ø 2 мм

Исследуя влияние экструдирования на углеводный комплекс обрабатываемого комбикорма можно отметить (таблица 2), что деструкция крахмала в экструдированном продукте повышается. Так, содержание растворимых углеводов увеличивается на

27-32 %, а перевариваемость крахмала в 2 раза в экструдированном комбикорме по отношению к необработанному.

Питательная ценность экструдированного продукта обусловливается содержанием и изменением в них не только белковых веществ и углеводов, но и наличием биологически активных веществ – витаминов. С этой целью проведены опыты по изучению влияния экструдирования на изменение содержания витаминов В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, Е и А в ячмене и комбикорме (таблица 3).

Результаты проведенных исследований показывают, что содержание витамина Е в ячмене и комбикорме уменьшилось на 23,0 и 7,3 % соответственно, а содержание витамина А в комбикорме снизилось на 5,6 %.

**В третьей главе** приведено аналитическое решение неизотермической математической модели, описывающей изменение температуры в винтовом канале экструдера. Отличительной особенностью моделирования процесса экструдирования зерновых культур при производстве комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота является то, что зерно нагревают до температуры начала реакции Майера, т. е. до 120-125 °С, не допуская при этом ее развитие.

Для решения математической модели были выбраны следующие ограничения и допущения:

– течение движущейся вязкой среды принимается ламинарным и установившимся;

– силы инерции и гравитации по сравнению с силами трения и давления настолько малы, что ими можно пренебречь;

– вязкая среда (расплав) представляет собой несжимаемую жидкость, характеризующуюся постоянными теплопроводностью и температуропроводностью;

– пренебрегали изменением теплопроводности в продольном направлении в связи с тем, что конвективный перенос теплоты в направлении течения выше, чем перенос теплоты теплопроводностью;

– теплопередача в направлении перпендикулярном течению расплава происходит только за счет теплопроводности.

Математическая модель неизотермического течения расплава зерновых культур включала:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \quad (1)$$

- уравнения движения:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y, \quad (2) \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \left( \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned}$$

- уравнение энергии:

$$\begin{aligned} \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) - \\ - T \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &- \left( \sigma_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \sigma_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \sigma_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \\ - \left[ \sigma_{xy} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \sigma_{zx} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \sigma_{yz} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right]. \quad (3) \end{aligned}$$

- реологическое уравнение:

$$\sigma_{yx} = \left( \frac{1}{\varphi} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – эффективная вязкость расплава при начальных условиях;  
 $m$  – постоянный коэффициент расплава зерновых культур.

Для решения системы уравнений (1)-(4) с учетом конвективной теплопередачи был использован численный метод конечных разностей. В результате решения получена математическая модель неизотермического течения расплава в канале экструдера:

$$T = T_{\text{cr}} + \frac{\varphi}{\lambda} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{m+1} \frac{(0,5H)^{m+3} - y^{m+3}}{(m+2)(m+3)}, \quad (5)$$

где  $T_{ст}$  – температура стенки, °С;  $x, y$  – координаты, м;  $H$  – высота канала шнека, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности расплава, Вт/(м·К).

Методом машинного эксперимента осуществлена проверка полученных решений на адекватность реальному процессу экструдирования. Сравнительный анализ расчетных значений температуры по полученной модели с экспериментальными данными показал высокую точность описания поля температур расплава при его неизотермическом течении в экструдере-среднеквадратичное отклонение не превышало 12,7 % (рисунок 8).

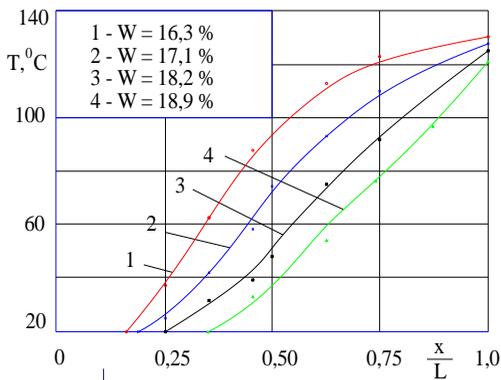


Рисунок 8. Изменение температур расплава зерновых культур по относительной длине рабочей камеры экструдера при различной начальной влажности

Данная математическая модель процесса экструзии зерновых культур при температурах начала реакции Майера, т. е. до 120-125°С, позволяет выявить характер изменения температуры по длине экструдера.

**В главе 4** приведены рецептуры комбикормов с защищенным белком

для крупного рогатого скота, полученные с помощью программы «Корм Оптима». Рецепт концентрата № ДК 650 кг, с защищенным протеином представлен в таблице 4.

Т а б л и ц а 4 – Рецепт концентрата № ДК 650 кг с защищенным протеином

Состав	В рецепте, %
Пшеница	8,7
Ячмень	30,4
Кукуруза	6,6
Отруби пшеничные	3,3
Горох	4,3
Защищенный протеин Сухоложский	29

Жом сушеный	13,2
Адсорбент	0,3
Соль поваренная	1,24
Известняковая мука	0,9
Сода пищевая	0,66
Магния окись	0,3
П60-3-1%-175911 Сухоложский	1,1

В рацион животных, который составляет 58,19 кг, вводят белок, устойчивый к распаду в рубце («защищенный белок») (рисунок 9). Он усваивается на 95-98 %, тогда как, например, белок из соевого шрота – только на 67 %. Пример расчёта продуктивности из грубых кормов представлен в таблице 5.

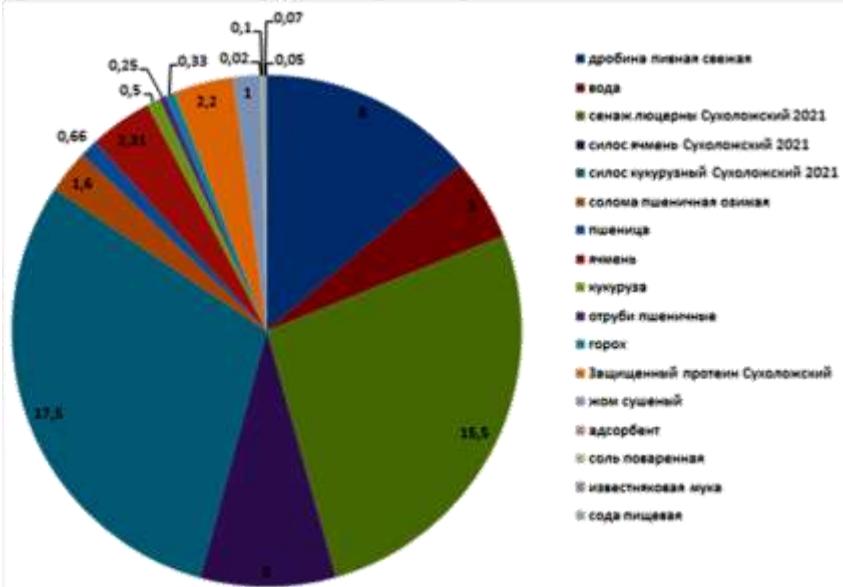


Рисунок 9 - Рацион № ДК 650 кг с защищенным протеином

Совместно с лабораторией физиологии пищеварения Всероссийского научно-исследовательского института физиологии, биохимии и питания животных – филиал ФГБУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени акад.

Л.К. Эрнста» проведена оценка содержания распадаемого и переваримого нераспадаемого протеина в пяти образцах кормового средства (таблица 6) и качества белковых компонентов (таблица 7). Исследования проведены на оперативных коровах.

Т а б л и ц а 5 - Пример расчёта продуктивности из грубых кормов

Показатели на корову в год	Традиционная технология	Предлагаемая технология
Молочная продуктивность	8000 кг	8000 кг
Содержание жира	3,7	4,1
Содержание белка	3,2	3,4
Молочная продуктивность, скор. по энергии	7772 кг	8245 кг
Расход концентратов	5 ц = 3459 МДж	-
Мелассированный жом	16 ц = 11200 МДж	-
Смесь концентратов 18СП	-	15 ц = 10050 МДж
Продуктивный комбикорм 18СП	-	-
Сумма ЧЭЛ	14650 МДж	10500 МДж
Соответствует стандартному прод. комбикорму	21,9 ц	15,0 ц
Соответствует молочной продуктивности	4465 кг	3130 кг
Молочная продуктивность без учёта концентратов	3302 кг	5181 кг
Сочные корма, богатые энергией	-	4,5 ц = 2997 МДж
Силосованная пивная дробина (26 % СВ) – в СВ	-	3,6 ц = 2664 МДж
Силосованный жом (22 % СВ) – в СВ	-	5661 МДж
Сума ЧЭЛ	-	1726 кг
Соответствует продуктивности	-	-
Молочная продуктивность из грубых кормов	3306 кг	3455кг

Определение распадаемости сырого протеина (СП) и сырого жира (СЖ) комбикормов рациона проводили методом *in sacco*, путем инкубации в рубце образцов комбикормов в нейлоновых мешочках в рубце.

Инкубацию проводили в течение 12 ч. Переваримость определяли методом мобильных мешочков путем выдерживания остатка комбикорма после инкубации в рубце в растворе соляно-

кислого пепсина в течение 1,5 ч. и последующем помещении в 12- перстную кишку и извлечении мешочков из кала. При высокой температуре из рапсовых жмыхов делают комбикорм, содержащий до 72 % неразпадаемого в рубце протеина (НРП) («защищенный белок»).

Т а б л и ц а 6 – Характеристика кормов in vitro (в рубце)

Образец	Показатели				
	Содержание протеина, г/100 г натур корма	Распадаемость за 12 часов инкубации, %		Переваримость нераспавшейся части в кишечнике, %	
		СВ	СП	СВ	СП
№ 1 без обработки	34,0625	74,8	82,94	51,2	74,8
№ 2 при $t = 120$ °С	38,5	75,5	82,04	48,9	75,5
№ 3 при $t = 140$ °С	38,6875	63,9	70,63	40,65	63,9
№ 4 при $t = 130$ °С	37,8125	62,2	71,47	46,4	62,2
№ 5 при $t = 150$ °С	37,8125	74,2	83,88	50,2	74,2

Т а б л и ц а 7 – Характеристика белковых компонентов

Наименование	Массовая доля влаги, %	Массовая доля сырого протеина в пересчете на абсолютно сухое вещество, %	Массовая доля сырой клетчатки в СВ, %	Массовая доля сырого жира на абсолютно сухое вещество, %
Шрот рапсовый БККЗ	10,5 ±0,3	41,63	8,1 ±1,3	2,76 ±0,51
Белковый продукт БККЗ	11,0 ±0,3	41,38	10,2 ±1,4	2,09 ±0,47
Жмых рапсовый хозяйственный	7,9 ±0,3	37,32	9,7 ±1,4	10,13 ±0,88

Как показали испытания, после его включения в рацион продуктивность увеличивается на 18 %, а содержание белка в молоке – на 12 %, рост надоя на корову составил 4 кг/сут.

Выбраковка животных вследствие улучшения пищеварения сократилась в 2 раза. Комбикорм с защищенным белком позволяет увеличить в рационе весь комплекс питательных веществ (количество обменной энергии, содержание сухого вещества, сырого и переваримого протеина, БЭВ, сахара и, наоборот, снизить содержание сырой клетчатки). Включение в рацион крупного рогатого скота защищенного белка способствует более интенсивному раздоя коров, активации микрофлоры рубца, что сопровождается повышенным синтезом молока.

**В пятой главе** приведено описание разработанных конструкции экструдера (рисунок 10), технологической линии производства высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом для крупного рогатого скота (рисунок 11) и методика инженерного расчета многозонного экструдера.

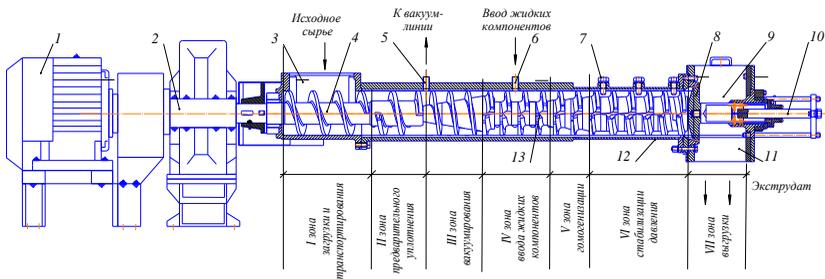


Рисунок 10 – Экструдер: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – загрузочный бункер; 4 – комбинированный шнек; 5 – патрубок для соединения с вакуум-линией; 6 – патрубок для ввода жидких компонентов; 7 – регулировочные болты; 8 – матрица; 9 – разгрузочная камера для выхода экструдата; 10 – регулировочный шток; 11 – выгрузочный лоток; 12 – рабочая камера; 13 – прорези

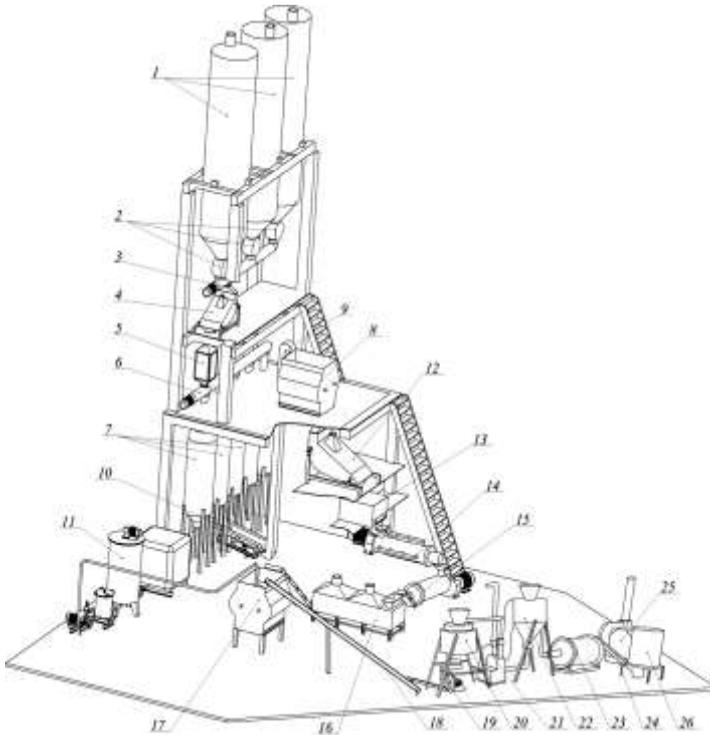


Рисунок 11 – Комплексная технологическая линия производства высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом: 1 – бункер; 2 – дозатор; 3 – шнековый питатель; 4 – просеиватель; 5 – магнитная головка; 6 – шнековый питатель; 7 – бункер; 8 – смеситель; 9 – нория; 10 – весы; 11 – установка для ввода животного комплекса; 12 – просеиватель; 13 – дробилка; 14 – кондиционер-пропариватель; 15 – экструдер; 16 – охладитель; 17 – смеситель; 18 ленточный транспортер; 19 – пресс-гранулятор; 20 – циклон; 21 – молотковая дробилка; 22 – циклон; 23 – барабанная сушилка; 24 – транспортер загрузочный; 25 – теплогенератор; 26 – загрузочный бункер для травы

### Основные выводы и результаты

1. Разработан рацион с защищенным белком, составляющий 58,19 кг, который усваивается на 95-98 % и обеспечивает повышение питательной ценности и поедаемости комбикормов.

2. Выявлены кинетические закономерности процесса влаготепловой обработки и последующего экструдирования зерновых культур для полу-

чения высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка для крупного рогатого скота с обоснованием рациональных параметров процесса экструдирования, установлен характер влияния технологических параметров.

3. Разработана математическая модель неизотермического течения расплава в канале экструдера, которая позволяет определить характер изменения температур расплава зерновых культур по длине рабочей камеры экструдера.

4. Проведенные исследования по определению эффективности потребления разработанных видов высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка показали, что применение комбикормов способствует повышению надоев молока на 14–22 %, снижению затрат корма на единицу произведённой продукции на 8–12 % за счет лучшей переваримости питательных веществ, сокращению выбраковки коров в 2 раза за счет улучшения пищеварения.

5. Разработан стандарт организации СТО 9296-540-02068108-2021 (технические условия) «Высокоусвояемые комбикорма с использованием защищенного белка для крупного рогатого скота».

6. Разработана конструкция экструдера, реализующая процесс экструзии зерновых культур при температурах начала реакции Майера для получения высокоусвояемых комбикормов с использованием защищенного белка для крупного рогатого скота.

7. Разработана комплексная технологическая линия производства высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком и витаминно-аминокислотно-энзимным комплексом для крупного рогатого скота, использование которой позволит повысить усвоение комбикорма за счет улучшения вкусовых качеств и питательной ценности протеинового комплекса.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### **Монография**

1. Использование кормовых ферментов при производстве высокоусвояемых комбикормов : монография / А.И. Александров, К. А. Сизиков, А. Н. Остриков, В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова: Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж : ВГУИТ, 2021. – 182 с.

#### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ**

2. Разработка стартерных комбикормов для крупного рогатого скота / В.А. Афанасьев, А.Н. Остриков, В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, К. А. Сизиков // Кормопроизводство. – 2020. – № 2. – С. 39-42.

3. Исследование кинетических закономерностей процесса экструдирования зерновых культур при производстве высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота / В.А. Афанасьев, Л.Н. Фролова, К.А. Сизиков, А.Н. Остриков, В.Н. Василенко // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83. - № 1.- С. 1-6.

4. Математическая модель процесса экструзии зерновых культур при неизотермическом течении их расплава до температуры начала реакции Майяра / В.А. Афанасьев, Л.Н. Фролова, К.А. Сизиков, А.Н. Остриков, С.Н. Зобова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83.- № 1.- С. 7-12.

#### **Конференции различного уровня**

5. Разработка ресурсосберегающей технологии псевдокапсулированных премиксов из отходов масложировой промышленности / В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, Н.А. Михайлова, К.А. Сизиков, И.В. Драган, С.И. Жильцова // Сб. науч. статей по итогам VI Междунар. науч. конф. «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». - Казань, 2020. С. 38-41.

6. Особенности производства комбикормов с защищенным белком для КРС / В.А. Афанасьев, Л.Н. Фролова, К.А. Сизиков // Матер. LVIII отчет. науч. конф. за 2019 год. В 3 ч.: ВГУИТ, 2020. Ч. 2. – С. 45-46.

7. Создание экологически безопасной технологии для производства комбикормов с использованием биогаза, получаемого при переработке отходов животноводческих комплексов / В.Н. Василенко, В.А. Афанасьев, Л.Н. Фролова, Н.А. Михайлова, И.В. Драган, К.А. Сизиков // Сб. стат. Междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия перспективного продовольственного машиностроения на основе современных технологий». – Воронеж : ВГУИТ, 2020. – 555 с.

8. Ресурсосберегающая технология экструдированных комбикормов для КРС / К.А. Сизиков, В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова // Матер. LIX отчет. науч. конф. за 2020 год. В 3 ч. / Воронеж, ВГУИТ, 2021. Ч. 2. – С. 28.

#### **Патенты на изобретения**

9. Пат. № 2740018 РФ, В01D 53/62, В01D 53/48. Комбинированная технологическая линия производства флюкированных хлопьев для стартерных и предстартерных комбикормов для молодняка сельскохозяйственных животных с использованием очищенного биогаза / Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Шевцов А.А., Терехина А.В., Филипцов П.В., Богомолов И.С., Сизиков К.А.; заявитель и патентообладатель АО «НПЦ «ВНИИКП». – № 2020101151, заявл. 10.01.2020; опубл. 30.12.2020, Бюл. № 1.

10. Пат. № 2292156 РФ, А23К 1/00, А23К 1/16. Способ выращивания бройлеров / Дроздова Л.И., Литусов Н.В., Лебедева И.А., Садовников Н.В., Кузнецов В.Н., Сизиков А.К., Эйриян С.К., Топорков Н.В., Мотовилов К.Я., Чебыкин А.М., Колчина А.Ф., Колчин Г.А.; заявитель и патентообладатель Уральская Государственная сельскохозяйственная академия (УрГСХА). – № 2005121359; заявл. 07.07.2005; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

11. Пат. № 2332853 РФ, А23К 1/00, А23К 1/16, А23К 1/165, А23К 1/175. Способ выращивания цыплят-гипотрофиков / Дроздова Л.И., Лебедева И.А., Садовников Н.В., Маслюк А.Н., Кузнецов В.Н., Сизиков А.К., Эйриян С.К., Топорков Н.В., Мотовилов К.Я., Колчин Г.А., Шацких Е.В., Зеленская О.В., Гайнутдинова Л.Х.; заявитель и патентообладатель Уральская Государственная сельскохозяйственная академия. – № 2006144549; заявл. 13.12.2006; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25.

12. Пат. № 2334405 РФ, А23К 1/00, А23К 1/16, А23К 1/175. Способ повышения сохранности и продуктивности бройлеров / Шацких Е.В., Лебедева И.А., Дроздова Л.И., Котомцев В.В., Эйриян С.К., Топорков Н.В., Зеленская О.В., Макеев О.Г., Сизиков А.К., Колчина А.Ф.; заявитель и патентообладатель Уральская Государственная сельскохозяйственная академия (УрГСХА). – № 2007108439; заявл. 06.03.2007; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27.

13. Пат. № 2343713 РФ, А23К 1/00, А23К 1/16, А23К 1/175. Способ кормления бройлеров в условиях йоддефицита / Шацких Е.В., Лебедева И.А., Дроздова Л.И., Эйриян С.К., Топорков Н.В., Зеленская О.В., Мотовилов К.Я., Кузнецов В.Н., Макеев О.Г., Котомцев В.В., Сизиков А.К., Цыганова О.С., Бельских О.В., Неволина И.Г., Володина О.Ю.; заявитель и патентообладатель Уральская Государственная сельскохозяйственная академия (УрГСХА). – № 2007116082; заявл. 27.04.2007; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2.

Подписано в печать 23.04.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ .

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»  
(ВГУИТ)

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»

Адрес университета и отдела полиграфии

394036, Воронеж, пр. Революции, 19