

*На правах рукописи*



**СЕМЕРНИНА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ДРОБИЛКИ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Мичуринск-наукоград РФ,

2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина» (ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Саенко Юрий Васильевич**

**Официальные оппоненты:** **Гулевский Вячеслав Анатольевич,**  
доктор технических наук, доцент, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», врио директора

**Коношин Иван Вячеславович,**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», кафедра «Механизация технологических процессов в АПК», доцент

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 23 декабря 2021 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс 8 (47545) 3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте [www.mgau.ru](http://www.mgau.ru), с авторефератом на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации [www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с подписью и датой, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Н.В. Михеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Для получения мяса выращивают крупный рогатый скот, птицу, а также свиней. На сегодняшний день свиноводство очень развитая отрасль. Это выгодно по ряду показателей. Прежде всего, свиньи очень быстро растут. При промышленном ведении свиноводства животных содержат в помещениях безвыгульно и кормят только комбикормами. Правильное, полноценное кормление животных может быть выполнено только при знании их потребности и обеспечения в элементах питания, минеральных веществах, витаминах. В процессе эволюции организм животных приспособился к большому многообразию кормов, одним из которых являются зелёные корма. При выдаче животному кормов питательные вещества воздействуют на организм животного не отдельно друг от друга, а в совокупности. Одним из дешевых способов обогащения комбикорма естественными витаминами является добавление в комбикорм пророщенного зерна. При выдаче пророщенного зерна отдельно от комбикорма, более сильные животные будут поедать большую часть, а слабые – будут получать меньше рассчитанной нормы. Чтобы все животные, находящиеся в боксе, получали массу пророщенного зерна прямо пропорционально съеденному корму, необходимо в комбикорм добавить пророщенное зерно и получить, таким образом, кормовую смесь. Пророщенное зерно состоит из зерновки и ростка, то есть представляет собой неоднородную массу. Размеры ростка составляют 2,5-3 см, что превышает размеры частиц комбикорма. Чтобы получить кормовую смесь на основе пророщенного зерна необходимо измельчить росток и зерновку до размера частиц комбикорма, затем перемешать измельченную массу с комбикормом. Чтобы измельчить неоднородный материал, которым является пророщенное зерно нужно использовать различные виды рабочих органов. Для измельчения зерна применяют молотки, а для измельчения ростков используют ножи.

Следовательно, разработка технических средств, обеспечивающих эффективное измельчение пророщенного зерна, является важной задачей.

**Степень разработанности темы.** Огромный вклад в развитие направлений исследования процессов подготовки кормов к скармливанию внесли: Горячкин В.П., Коба В.Г., Мельников С.В., Сыроватка В.И., Труфанов В.В., Завражнов А.И., Краснов И.Н., Мухин В.А., Гулевский В.А., Коношин И.В., Сергеев Н.С., а также другие отечественные и зарубежные ученые.

Сложность измельчения пророщенного зерна заключается в том, что исходный материал является неоднородной средой и состоит из более плотной зерновки и менее плотного ростка, которые отличаются друг от друга плотностью, твердостью, геометрическими размерами, структурой, скоростью витания, коэффициентом парусности. После измельчения исходного продукта необходимо получить частицы, близкие по размеру комбикорма.

В вопросах измельчения кормов применяются различные подходы к комплексной оценке технических средств и их функционированию.

**Цель работы** – повышение эффективности измельчения пророщенного зерна за счет оптимизации конструктивно-технологических параметров дробилки.

### **Задачи исследований:**

1. обосновать конструктивно-технологическую схему дробилки с учетом неоднородной структуры пророщенного зерна;
2. разработать математические модели, учитывающие число молотков и ножей; обосновать углы заточки ножей; влияние конструктивных и конструктивно-режимных параметров дробилки на качественные показатели процессов; провести расчет производительности дробилки и энергетических показателей процесса измельчения;
3. разработать методики оценки качественных и количественных показателей работы дробилки;
4. провести экспериментальные исследования и определить влияние конструктивно-режимных параметров на качественные и количественные показатели работы дробилки, выполнить оптимизацию конструктивных и режимных параметров дробилки пророщенного зерна;
5. выполнить производственную проверку и оценить технико-экономические показатели дробилки пророщенного зерна.

**Объект исследования.** Процесс измельчения пророщенного зерна рабочими органами дробилки.

**Предмет исследования.** Закономерности измельчения ростков пророщенного зерна рабочими органами дробилки.

**Научную новизну составляют:** конструктивная схема дробилки пророщенного зерна с комбинированной дробильной камерой; математические модели, учитывающие влияние конструктивных параметров и режимов работы дробилки пророщенного зерна на процесс измельчения; результаты оптимизации конструктивно-режимных параметров дробильной камеры на основе методов безразмерных критериев оптимизации.

### **Теоретическую значимость представляют:**

- моделирование процесса измельчения пророщенного зерна в дробильной камере, в которой продукт разделяется на потоки с различными физическими свойствами, а измельчение осуществляется двумя типами рабочих органов;
- полученные модели и зависимости, позволяющие оценить эффективность процесса измельчения с учетом геометрии рабочих органов и динамики процесса, включающие математические модели расчета: молотков и ножей, установленных соответственно на молотковом и ножевом барабанах.

### **Практическую ценность представляют:**

- конструктивно-технологическая схема дробилки пророщенного зерна, которая обеспечивает равномерное измельчение зерна и ростков (патент РФ № 2692559, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2019616509, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2021619705).
- оптимизация технологического процесса измельчения пророщенного зерна, выполняемого предлагаемой дробилкой по энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и модуля помола, частоты вращения ножевого барабана;

- результаты экспериментальных исследований и регрессионные зависимости, учитывающие влияние частоты вращения дробильного и ножевого барабанов, толщины молотка, диаметра дробильного барабана; расстояния между ножами, угла заточки лезвия ножа на модуль помола пророщенного зерна;
- рекомендуемые конструктивно-режимные параметры дробилки, обеспечивающие равномерность измельчения зерна и ростков, согласно зоотехническим требованиям;
- результаты производственной проверки дробилки пророщенного зерна в условиях КФХ Юрьев А.Ю.

**Реализация результатов исследований.** Дробилка пророщенного зерна прошла производственную проверку в Крестьянском (фермерском) хозяйстве Юрьев А.Ю. в Валуйском районе Белгородской области и показала высокую эффективность, и надежность работы оборудования.

Материалы исследований по разработке средств механизации проращивания и подготовки зерна к скармливанию используются в качестве методических пособий в учебном процессе ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных научных задач использовались фундаментальные физические законы и математические методы исследования. С помощью математического анализа и законов механики производили теоретическое обоснование процесса измельчения, а при помощи методов регрессионного анализа и оценки достоверности результатов определяли оптимальные параметры и режимы работы дробилки пророщенного зерна. Экспериментальные исследования проводились стандартными и частными методами и инструментами. В результате проведенных экспериментов полученные значения обрабатывали с использованием ПЭВМ.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- конструктивно-технологическая схема дробилки пророщенного зерна, отличающаяся дробильной камерой, имеющей два типа рабочих органов: для дробления и резания продукта;
- математические модели и результаты теоретических исследований, включающие расчеты производительности с учетом конструктивно-технологических параметров дробильной камеры; расчет числа рабочих органов, установленных в дробильной камере с учетом скорости подачи продукта, частоты вращения ножевого барабана; расчет геометрии ножа с учетом прочностных свойств материала на основе безразмерных критериев; расчет удельных затрат на измельчение с учетом степени измельчения продукта;
- результаты экспериментальных исследований и регрессионные зависимости, включающие: влияние конструктивно-режимных параметров на модуль помола и энергетические показатели процесса измельчения;
- результаты производственных испытаний и технико-экономической оценки дробилки пророщенного зерна.

**Степень достоверности.** Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертации, обеспечивается применением общенаучных методов и приемов. Экспериментальные исследования выполнены на современном оборудовании по апробированным методикам. Сходимость теоретических и эксперимент-

альных данных позволяет говорить об адекватности предложенных математических моделей и не противоречит фактам, известным из специальной литературы.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены и одобрены на научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и специалистов в Белгородском ГАУ «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее» (28-29 мая 2019 года); на национальной международной научно-производственной конференции «Наука аграрному производству: актуальность и современность» (2018 года); на научно-практической конференции «Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве» Воронежский ГАУ, 2020; на расширенном заседании кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе» Белгородский ГАУ, 2021 г.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 14 научных работ, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Общий объем публикаций составляет 4,19 печ. л., из которых 3,2 печ. листа принадлежат лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 180 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников литературы из 158 наименований, в том числе 6 – на иностранных языках, содержит 83 рисунка, 12 таблиц и 9 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Обоснована актуальность темы, указана цель работы, вытекающие из нее задачи, и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследований дробления пророщенного зерна»** систематизированы способы измельчения зерна перед скармливанием или добавлением его для получения кормовой смеси, результаты научных исследований и известные технические решения.

В процессе измельчения зерна происходит увеличение площади поверхности частиц, поэтому, попадая в организм животных такой продукт большей поверхностью, по сравнению с неизмельченным продуктом будет эффективнее взаимодействовать с желудочным соком животного, в результате чего питательные вещества усвоятся полнее. Скармливание переизмельченного продукта может привести к заболеванию желудочно-кишечного тракта. Конечный размер частиц измельченного продукта, рекомендуемого к использованию, зависит от вида животного, или птицы, возрастной группы.

Работы выполнялись на основе системного и комплексного подхода в несколько этапов согласно структурной схеме, представленной на рисунке 1.

Для измельчения зерна и зернопродуктов большое распространение получили молотковые дробилки за свою простоту конструкции, высокую надежность. Молотковые дробилки используют для измельчения: зерна, шрота, жома. Устанавливая решетку с различным диаметром отверстий, регулируем необходимый размер частиц.



Рисунок 1 – Структурная схема программы работ

С учетом влажности массы, прочности, пропускная способность и энергоемкость дробилок колеблется в широких диапазонах. Но у молотковых дробилок есть и некоторые недостатки, одним из которых является неоднородность размеров частиц измельченного продукта.

Оценку процесса измельчения продукта необходимо давать не только по удельным затратам энергии на измельчение, по модулю помола, но и по наличию пылевидной фракции (менее 0,25 мм) в измельченном корме. Переизмельчение корма приводит к увеличению энергоемкости процесса.

Проанализировав конструкции молотковых дробилок можем отметить, что они не могут быть использованы для измельчения неоднородных материалов, имеющих различную плотность, структуру волокон. Таким материалом является пророщенное зерно. Существующие молотковые дробилки после измельчения оставляют неоднородный материал, имеющий различные геометрические размеры. Для измельчения пророщенного зерна рекомендуется использовать дробилку с двумя видами рабочих органов: молотки и ножи. Первые будут измельчать зерновку, а вторые – ростки.

**Во второй главе «Теоретическое обоснование конструктивно-режимных параметров экспериментальной дробилки»** представлена конструктивно-технологическая схема дробилки пророщенного зерна с комбинированной дробильной камерой. Дробильная камера содержит два барабана, на которых смонтированы молотки и ножи. В литературе процесс дробления зерна был рассмотрен довольно подробно, поэтому наибольший интерес представляет процесс

резания. Были проведены теоретические исследования процесса измельчения пророщенного зерна. Особенность процесса измельчения пророщенного зерна заключается в том, что измельчаемый продукт представляет собой неоднородную по форме и плотности структуру: короткая по длине зерновка с прикрепленным к ней, отличающимся по длине и плотности, ростком. Поэтому в процессе измельчения энергетические показатели будут зависеть от взаимодействия измельчающего органа с объектом измельчения.

На измельчение поступает высушенное проросшее зерно, представляющее фактически два слабо скрепленных, отличающихся по своим свойствам объекта – зерновка и росток. При первом взаимодействии с измельчающим органом происходит отделение зерновки от ростка, и продукт фактически превращается в трехфазную структуру: воздушная среда, зерновка и росток. Следовательно, при измельчении необходимо учитывать различие свойств зерновки и ростка.

Наиболее оптимальным способом измельчения таких продуктов является использование принципа молотковой дробилки. И если обеспечить разделение продукта на потоки с последующим измельчением каждого из разделенных однородных по структуре продуктов. Такой индивидуальный подход позволит снизить общие затраты энергии на измельчение продукта и повысить производительность устройства. Разделение процессов измельчения каждой из фаз возможно при использовании конструктивной схемы комбинированной дробильной камеры, разрез которой, плоскостью, перпендикулярной оси вращения, изображен на рисунке 2.

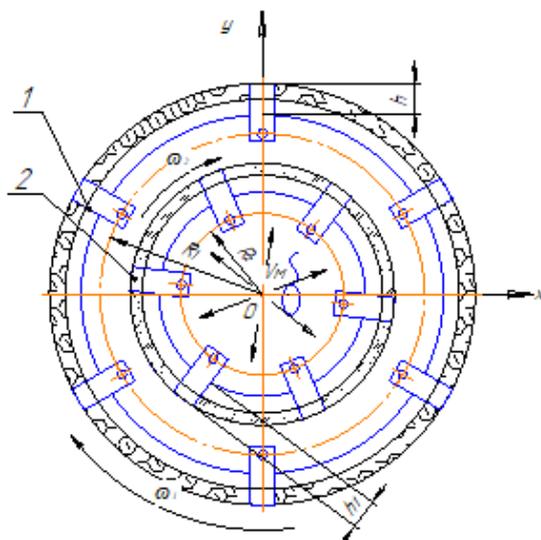


Рисунок 2 – Кинематическая схема комбинированной дробильной камеры:  
*1 – молоток; 2 – нож;  $R_1, R_2$  – соответственно радиусы закрепления молотков и ножей на своих роторах, м;  $\omega_1, \omega_2$  – соответственно угловые скорости вращения частиц в молотковом и ножевом слое,  $c^{-1}$ ;  $h$  – длина рабочей части молотков, м;  $h_1$  – длина рабочей части ножей, м*

Разрез дробильной камеры выполнен в вертикальной плоскости. Внутри дробильной камеры установлена дека. Ножи осуществляют бесподпорное резание.

Более тяжелые частицы зерновки, за счет сообщенной им большей энергии, перемещаются дальше от центра дробильной камеры, составляют периферийный слой и взаимодействуют с периферийной системой молотков, а более легкие и

длинные ростки за счет сообщенной им меньшей энергии составляют внутренний слой и взаимодействуют с внутренней системой ножей. Таким образом, происходит измельчение нескольких слоев продукта в одной камере.

Общая производительность измельчителя  $Q$  (кг/с) будет определяться производительностью измельчения в каждом слое:

$$Q = q_1 + q_2, \quad (1)$$

где  $q_1$  – производительность в слое молотков, кг/сек;  $q_2$  – производительность в слое ножей, кг/сек.

Если выбранное число молотков  $k_{z1}$  в каждом из измельчающих барабанов обеспечивают разрушение частиц за 1 оборот ротора, производительность в слое молотков может быть определена интегрированием элементарного сечения измельченного материала по траектории движения молотков и ножей:

$$\Delta q_1 = \Delta S_1 v_1 \rho_1 \mu_{ц1}, \quad (2)$$

$$\Delta q_2 = \Delta S_2 v_2 \rho_2 \mu_{ц2}, \quad (3)$$

где  $\Delta q_1, \Delta q_2$  – соответственно элементарная производительность при измельчении в молотковом и в ножевом слое, кг/с;  $\Delta S_1, \Delta S_2$  – соответственно элементарные сечения молоткового и ножевого слоя, м<sup>2</sup>;  $v_1, v_2$  – соответственно линейные скорости движения элементарных сечений молоткового и ножевого слоя, м/с;  $\rho_1, \rho_2$  – соответственно плотность зерновки и ростка, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{ц1}, \mu_{ц2}$  – концентрация частиц в молотковом и ножевом слое, кг/кг.

В этом случае расчетная производительность в каждом слое может быть определена интегрированием по высоте слоя:

$$q_1 = \int_{R_1}^{R_1+h_{сл1}} Lv\omega_1\rho_1\mu_{ц1}rdr, \quad (4)$$

$$q_2 = \int_{R_2}^{R_2+h_{сл2}} Lv\omega_2\rho_2\mu_{ц2}rdr, \quad (5)$$

где  $R_1, R_2$  – соответственно радиусы закрепления молотков и ножей на своих роторах, м;  $h_{сл1}, h_{сл2}$  – соответственно высоты молоткового и ножевого слоя, м;  $L$  – ширина барабана, м;  $\omega_1, \omega_2$  соответственно угловые скорости частиц в молотковом и ножевом слое, с<sup>-1</sup>; .

После интегрирования получаем расчетные значения производительности в каждом слое:

$$q_1 = \omega_1 L h_{сл1} \rho_1 \mu_{ц1} \left( R_1 + \frac{h_{сл1}}{2} \right), \quad (6)$$

$$q_2 = \omega_2 L h_{сл2} \rho_2 \mu_{ц2} \left( R_2 + \frac{h_{сл2}}{2} \right), \quad (7)$$

Таким образом, общая производительность измельчителя  $Q$  (кг/с) равна:

$$Q = \frac{\pi L}{30} \left[ n_1 h \rho_1 \mu_{ц1} \left( R_1 + \frac{h}{2} \right) + n_2 h_1 \rho_2 \mu_{ц2} \left( R_2 + \frac{h_1}{2} \right) \right]. \quad (8)$$

где  $h$  – длина рабочей части молотков, м;  $h_1$  – длина рабочей части ножей, м.

Расчетные значения числа молотков (ножей) установленных на дробильном и ножевом барабанах определяются с учетом угловой скорости барабанов, ширины барабанов, суммарной толщины дисков, не перекрывааемых молотками, скорости подачи пророщенного зерна в дробильную камеру:

– число молотков

$$z_1 = \frac{2\pi V_M}{\omega_1 h} (L - \Delta L_1) / a_1, \quad (9)$$

– число ножей

$$z_2 = \frac{2\pi V_{M2}}{\omega_2 h_1} (L - \Delta L_2) / a_2, \quad (10)$$

где  $a_1$  – толщина молотка, м;  $a_2$  – толщина ножа, м;  $V_M$  – скорость подачи материала, м/с;  $\Delta L$  – суммарная толщина дисков, не перекрываемая молотками (ножами), м;

Согласно проведенным расчетам наибольшая производительность дробильной установки будет находиться в диапазоне 0,52-0,56 т/ч, если обеспечить частоту вращения дробильного барабана 2200-2600 мин<sup>-1</sup>, а частоту вращения ножевого барабана 2600-2800 мин<sup>-1</sup>. Если обеспечить частоту вращения ножевого барабана 2640-2950 мин<sup>-1</sup> при толщине ножей в интервале 1,9-2,7 мм, то рекомендуемое количество ножей составит 62-68.

**В третьей главе «Методика проведения экспериментальных исследований дробилки пророщенного зерна»**, в соответствии с общей схемой исследований, теоретические исследования были направлены на изучение и выявление закономерностей измельчения пророщенного зерна.

В качестве критерия оптимизации измельчения приняли один параметр – модуль помола, характеризующий конечные размеры измельченных частиц и соответственно степень измельчения продукта в каждом слое.

В таблице 1 представлены значения факторов, влияющих на модуль помола пророщенного зерна в дробильном барабане. Число рабочих органов в дробильной камере принимались равными: число молотков 72 шт; число ножей 66 шт. Плотность, твердость, пророщенного зерна, парусность, скорость витания во всех точках эксперимента были постоянными. В таблице 2 представлены значения факторов, влияющих на модуль помола пророщенного зерна в ножевом барабане.

Таблица 1 – Факторы, влияющие на модуль помола пророщенного зерна в дробильном барабане

Обозначение	Наименование фактора	Уровни варьирования факторов		
		-1	0	+1
X <sub>1</sub>	Частота вращения дробильного барабана, $n_D$ мин <sup>-1</sup>	2000	2500	3000
X <sub>2</sub>	Толщина молотка, $h_M$ мм;	0,002	0,003	0,004
X <sub>3</sub>	Диаметр барабана, $D_b$ м;	0,6	0,65	0,7

Таблица 2 – Факторы, влияющие на модуль помола в ножевом барабане

Обозначение	Наименование фактора	Уровни варьирования факторов		
		-1	0	+1
X <sub>1</sub>	Угол заточки лезвия ножа, $\gamma_H$ град	10	20	30
X <sub>2</sub>	Расстояние между ножами, $a$ мм	7	14	21
X <sub>3</sub>	Частота вращения дробильного барабана, $n_H$ мин <sup>-1</sup>	2000	2500	3000

Экспериментальный образец дробильной установки пророщенного зерна с комбинированной дробильной камерой представлен на рисунке 7.

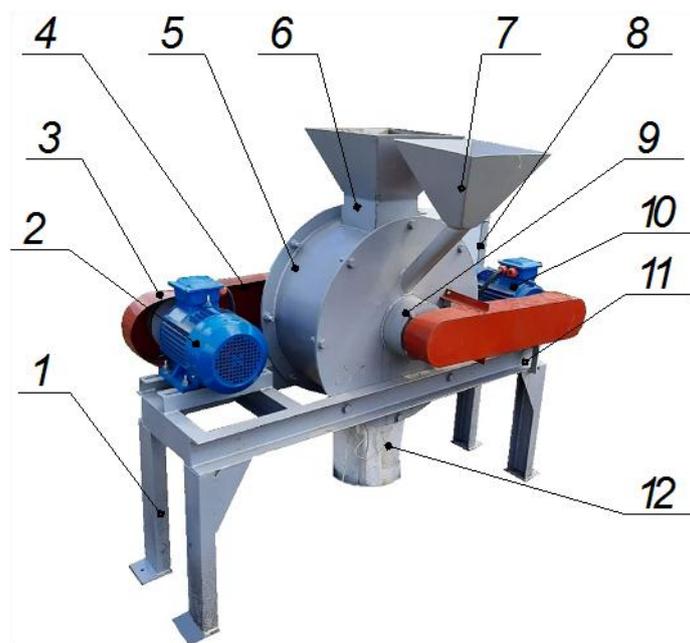


Рисунок 7 – Экспериментальная дробильная установка для пророщенного зерна:  
 1 – опора; 2 – электродвигатель для привода внешнего барабана; 3 – кожух защитный;  
 4 – передача ременная; 5 – камера дробильная; 6 – бункер центральный; 7 – бункер боковой;  
 8 – шкаф управления; 9 – узел подшипниковый; 10 – электродвигатель для привода  
 внутреннего барабана; 11 – рама; 12 – рукав выгрузной

**В четвертой главе «Результаты и анализ экспериментальных исследований»** отражены результаты экспериментальных исследований процесса измельчения пророщенного зерна с применением установки с комбинированной дробильной камерой.

Результаты измельчения пророщенного зерна измеряли после прохождения пророщенным зерном последовательно двух ступеней измельчения – барабан с молотками и ножевой барабан.

Каждую кормовую добавку: пророщенную высушенную пшеницу и ячмень измельчали отдельно. Общая мощность электродвигателей составляла 8 кВт, в зависимости от степени измельчения энергоёмкость составила от 6,7-8,3 кВт ч/т.

При измельчении пророщенного ячменя производительность у дробилки зарегистрировали на отметке 515 кг/ч. Анализируя качественные показатели работы, отметим, что недоизмельченная фракция составила 3,3%, переизмельченная фракция – 1,8%, требуемая фракция – 93,41%, потери получились порядка 1,49%.

При измельчении пророщенной пшеницы производительность у дробилки зарегистрировали на отметке 522 кг/ч. Анализируя качественные показатели работы, отметим, что недоизмельченная фракция составила 3,35%, переизмельченная фракция – 1,4%, требуемая фракция – 93,61%, потери получились порядка 1,64%.

Обработка результатов экспериментальных исследований, в соответствии с планом таблицы 1, позволила получить уравнение регрессии, учитывающее влияние воздействующих факторов на модуль помола пророщенного зерна.

Уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$M_{П1} = -19,48 + 0,0007n_D + 9,97h_M + 0,57D_б + 0,0000002n_D^2 - 0,00028n_Dh_M - 0,000065n_D D_б + 4,76h_M^2 - 0,15h_M D_б - 0,003D_б^2. \quad (11)$$

Коэффициенты уравнения являются значимыми, адекватность модели удовлетворяет критерию Фишера.

Коэффициент корреляции для данного уравнения регрессии составляет  $R = 87,27\%$ .

Анализ уравнения регрессии (11) показал, что модуль помола пророщенного зерна после дробильного барабана, в области исследуемых факторов, составил 1,2-1,3 и достигается при:  $n_D$  – частоте вращения дробильного барабана, 2550-2580 мин<sup>-1</sup>;  $h_M$  – толщине молотка, 0,002-0,003 м;  $D_б$  – диаметре барабана, 0,6-0,62 м.

Обработка результатов экспериментальных исследований, в соответствии с планом таблицы 2, позволила получить уравнения регрессии, учитывающее влияние воздействующих факторов на модуль помола  $M_{П2}$ , мм, после измельчения ножевым барабаном. Уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$M_{П2} = 1,077 - 0,00085n_H + 0,033b_H + 0,1\gamma_H + 0,0000002 n_H^2 - 0,0000038\omega_б b_H - 0,000017\omega_б \gamma_H + 0,001 b_H^2 - 0,001 b_H \gamma_H - 0,0011 \gamma_H^2. \quad (12)$$

Коэффициент корреляции для данного уравнения регрессии составляет  $R = 88,52\%$ .

Анализ уравнения регрессии (12) показал, что модуль помола пророщенного зерна после ножевого барабана, в области исследуемых факторов, составляет 1,25-1,3 и достигается при:  $n_H$  – частоте вращения ножевого барабана, 2820-2840 мин<sup>-1</sup>;  $b_H$  – расстоянию между ножами, 12-14 мм;  $\gamma_H$  – угле заточки лезвия ножа, 14-15°.

На рисунке 8 представлена поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от угла заточки ножа и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения.

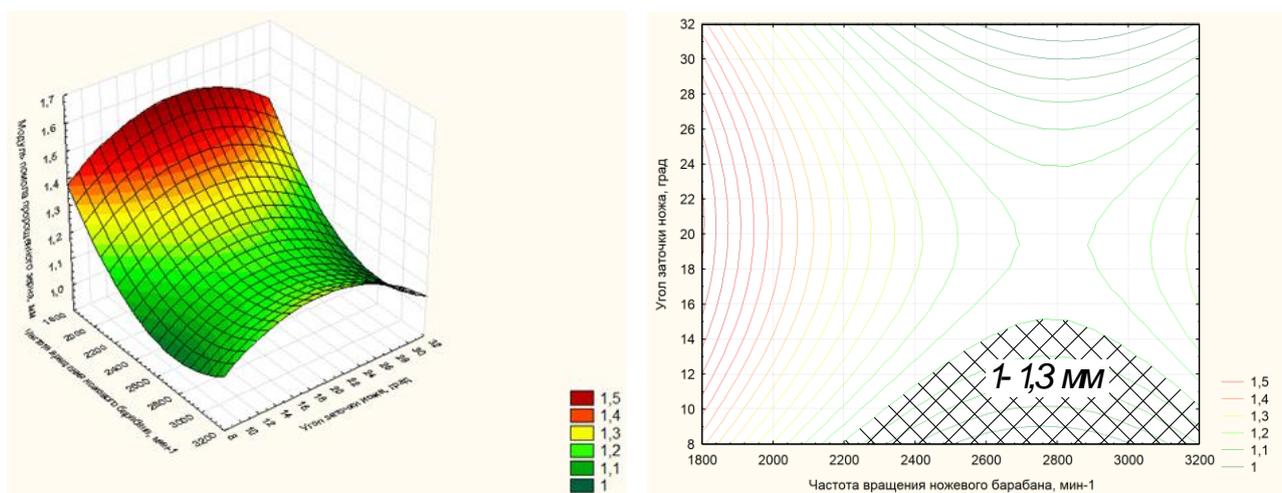


Рисунок 8 – Поверхность отклика модуля помола пророщенного зерна от угла заточки ножа и частоты вращения ножевого барабана, и ее двумерные сечения

Выполнив анализ поверхности отклика, на рисунке 8 прослеживается следующая взаимосвязь, что после измельчения ножами, необходимый модуль

помола составил 1-1,3 мм, при частоте вращения ножевого барабана от 2200-3000 мин<sup>-1</sup> и угле заточки ножей 12-16 град. Увеличение угла заточки ножа от 16 до 18 град способствует повышению модуля помола до 1,6-1,7 мм, что превышает рекомендованное значение 0,9-1,4 мм.

Проведены исследования по влиянию конструктивных и технологических параметров на энергоемкость процесса. На рисунке 9 представлена поверхность отклика энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и модуля помола, и ее двумерные сечения.

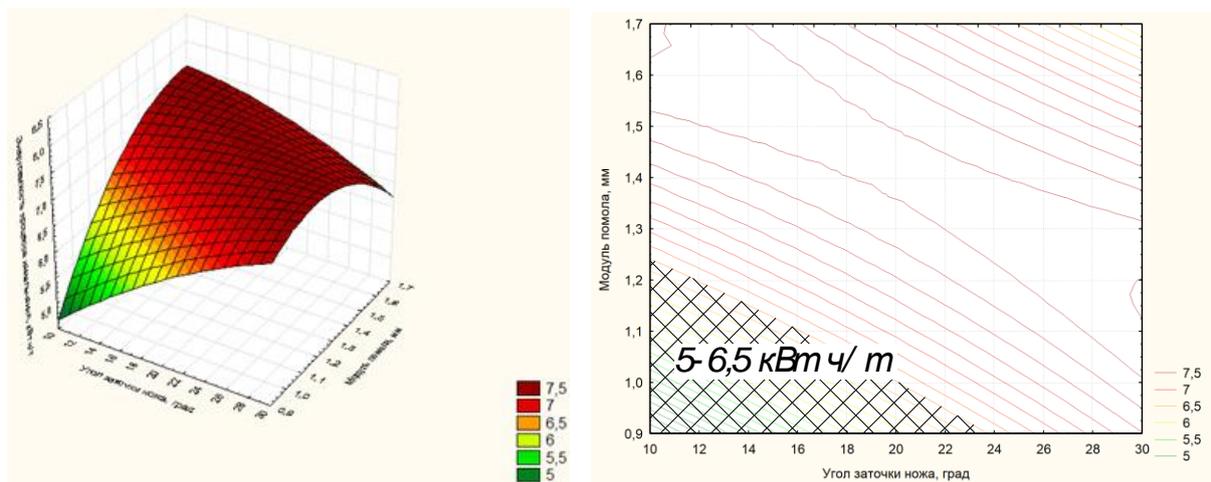


Рисунок 9 – Поверхность отклика энергоемкости измельчения пророщенного зерна от угла заточки ножа и модуля помола, и ее двумерные сечения

На энергоемкость существенно влияют модуль помола и угол заточки ножа. Эти результаты косвенно согласуются с теоретическими результатами при расчете физического критерия оптимальности на измельчение.

На основе экспериментальных исследований получены зависимости влияния частот вращения ножевого и дробильного барабанов на общую производительность дробилки. Поверхность отклика производительности дробильной установки от частоты вращения дробильного и ножевого барабанов, и ее двумерные сечения приведены на рисунке 10.

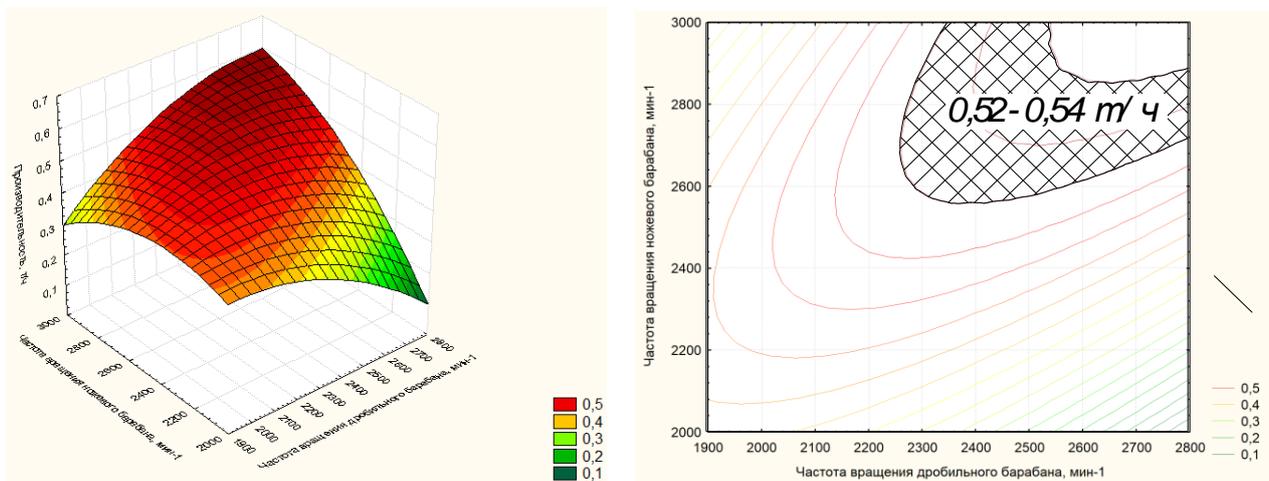


Рисунок 10 – Поверхность отклика производительности дробильной установки от частоты вращения дробильного и ножевого барабанов, и ее двумерные сечения

Наибольшая производительность дробильной установки будет находиться в диапазоне 0,52-0,54 т/ч, если обеспечить частоту вращения дробильного барабана 2200-2600 мин<sup>-1</sup>, а частоту вращения ножевого барабана 2600-2850 мин<sup>-1</sup>

**В пятой главе «Технико-экономическая оценка результатов исследования»** приведен расчет технико-экономической эффективности дробилки пророщенного зерна с учетом их производительности и стоимости.

В результате проведенных расчетов установлено, что в предложенной дробилке пророщенного зерна часовая производительность составляет 522 кг/ч. (сменная производительность 2,088 т/смену) при влажности пророщенного зерна  $W_1 = 14-16\%$ . Затраты на измельчение 1 т зерна составят 818,52 руб./тонну.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1 На основании анализа существующих конструкций дробилок указаны их недостатки, которые не позволяют измельчить зерновки и ростки пророщенного зерна, имеющие разные начальные размеры, до величин, соответствующих технологии приготовления комбикормов. Для измельчения пророщенного зерна рекомендуется использовать дробилку с двумя видами рабочих органов, которые будут обеспечивать дробление зерновки и резание ростков. Определено направление разработки дробилки пророщенного зерна, обоснована её конструктивно-технологическая схема.

2 В результате исследований структуры пророщенного измельченного зерна установлено, что пророщенное зерно является неоднородным продуктом, который состоит из зерновки и ростка. Зерновка состоит из следующих составляющих: оболочки, мучнистого тела и зародышевой части. С учетом проведенного структурного анализа пророщенного зерна следует важный технологический вывод: для того, чтобы измельчить такой неоднородный материал как пророщенное зерно необходимо использовать два типа рабочих органов: молотки и ножи.

3 В результате экспериментальных исследований процесса измельчения пророщенного зерна по разработанным методикам установлено, что применение в одной камере молотков и ножей позволяет получить при измельчении пророщенного зерна материал, средние размеры которого составляют 1,1-1,3 мм. Следовательно, применение в дробилках для пророщенного зерна двух видов рабочих органов (молотков и ножей) позволяет получить высокую степень однородности продукта с необходимой степенью измельчения.

4 На основе проведенных теоретических исследований получены математические модели для анализа и расчета конструктивных и технологических параметров дробилки:

– оптимального количества молотков. Установлено, что для обеспечения модуля помола зерновки пророщенного зерна в интервале 0,9-1,4 мм рекомендуемое количество молотков составляет 68-72 единицы, которые можно установить на дробильном барабане, если обеспечить его частоту вращения 2400-2600 мин<sup>-1</sup>, при толщине молотков в интервале 2,5-3,8 мм.; рекомендуемое

количество ножей составляет 62-68 единиц, которые можно установить на ножевом барабане, если обеспечить его частоту вращения 2640-2950 мин<sup>-1</sup>, при толщине ножей в интервале 1,9-2,7 мм.

– производительности дробильной установки. Установлено, что производительность принимает наибольшее значение 0,52-0,56 т/ч, если обеспечить частоту вращения дробильного барабана 2200-2600 мин<sup>-1</sup>, а частоту вращения ножевого барабана 2600-2800 мин<sup>-1</sup>.

– удельных затрат на измельчение с обеспечением необходимых конечных размеров зерновки и ростка пророщенного зерна. Удельные затраты находятся в диапазоне 47-52 кДж/кг при степени измельчения ростков от 20,71 до 24,17 единиц и степени измельчения зерновки от 7,86 до 9,17 единиц, энергоемкость процесса измельчения составит 6,2-8,3 кВт ч/т.

5 Предложены критериальные зависимости для оценки удельных энергозатрат при измельчении пророщенного зерна. На основе критерия оптимальности процесса резания по минимуму удельных энергозатрат на сжатие в результате проведенных расчетов установлено: для резания продукта ( $\sigma = 0,08$  МПа;  $\tau = 0,32$  МПа) с толщиной слоя 4 мм конструктивные параметры должны быть следующими: толщина ножа  $a = 2$  мм, толщина режущей кромки ножа  $\delta = 0,05$  мм; угол заточки  $\gamma$  равен  $14^0$ ; длина участка заточки ножа  $z = 7,821$  мм.

В результате экспериментальных исследований по оценке энергоемкости процесса измельчения установлено: при измельчении ножами энергоемкость составила 5,76-7,2 кВт ч/т при модуле помола 1-1,25 мм и угле заточки ножа 12-22 град. и при частоте вращения ножевого барабана 2520-2960 мин<sup>-1</sup>. Установлено, что при производительности дробилки 0,52 т/ч и уменьшении степени измельчения ростков с 24,17 до 20,71 единиц энергоемкость измельчения возрастет с 6,2 до 7,23 кВт ч/т. Общая энергоемкость процесса измельчения пророщенного зерна, в том числе ростков и зерновки изменится с 8 до 9,35 кВт ч/т.

6 На основе экспериментальных исследований с применением методов планирования эксперимента получены регрессионные уравнения, учитывающие влияние конструктивных и технологических параметров дробилки на модуль помола. В результате анализа уравнений регрессии и поиска оптимальных значений параметров установлено:

– модуль помола пророщенного зерна после измельчения дробильным барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,2-1,3 мм и может быть получен при:  $n_d$  – частоте вращения дробильного барабана, 2550-2580 мин<sup>-1</sup>;  $h_M$  – толщине молотка, 0,002-0,003 м;  $D_b$  – диаметре барабана, 0,6-0,62 м;

– модуль помола пророщенного зерна после измельчения ножевым барабаном, в области исследуемых факторов, находится в диапазоне 1,25-1,3 мм и может быть получен при:  $n_H$  – частоте вращения ножевого барабана, 2820-2840 мин<sup>-1</sup>;  $b_H$  – расстоянию между ножами, 12-14 мм;  $\gamma_H$  – угле заточки лезвия ножа,  $14-15^0$ .

7 В результате производственной проверки и технико-экономического обоснования определено, что в предложенной молотковой дробилке с комбинированной дробильной камерой часовая производительность составляет 522 кг/ч (сменная производительность 2,088 т) при влажности пророщенного зерна  $W_1 = 14-16\%$ . Затраты на измельчение 1 т зерна составят 818,52 руб.

## **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Полученные результаты могут быть использованы при разработке или модернизации машин для измельчения неоднородных материалов.

Результаты научных исследований могут быть использованы в конструкторских бюро предприятий сельскохозяйственного машиностроения при разработке дробилок с двумя измельчающими барабанами, которые имеют одну ось вращения, с целью получения однородной массы.

2. Перспективы настоящей работы заключаются в том, что результаты исследований могут быть использованы в разработке средств механизации, которые будут измельчать пророщенное зерно и гидропонный корм без предварительной сушки.

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

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. **Семернина, М.А.** Расчет конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, В.А. Самсонов, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Вестник аграрной науки Дона. – 2020. – № 1 (41). – С. 59 - 65.

2. **Семернина, М.А.** Оптимизация конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, В.А. Самсонов, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы: Майский, 2020. – № 2. – С. 26-37.

3. **Семернина, М.А.** Дробилка для измельчения пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Сельский механизатор, 2021. – № 1. – С. 18-20.

4. **Семернина, М.А.** Дробилка для зерна с комбинированной дробильной камерой [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы: Майский, 2021. – № 1. – С. 27-39.

5. **Семернина, М.А.** Исследование эффективности применения кормовых смесей с использованием пророщенного зерна в рационах свиней на откорме [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, В.Ю. Страхов, М.А. Семернина // Вестник Курской ГСХА. – 2019. – № 3. – С.80-86.

*В описаниях и изобретениях:*

6. Пат. 2692559 Российская Федерация С1 МПК В02С 13/00 (2006.01), В02С 18/00 (2006.01), В02С 9/00 (2006.01), В02С 23/00 (2006.01), СПК В02С 13/00 (2019.05), В02С 18/00 (2019.05), В02С 9/00 (2019.05), В02С 23/00 (2019.05) Дробилка пророщенного высушенного зерна [Текст] / Вендин С.В., Саенко Ю.В., Казаков К.В., **Семернина М.А.** заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. – № 2018135786, заявл. 09.10.2018, опубл. 25.06.2019 г. Бюл. № 18. 13 с.

7. Программа для ЭВМ № 2019616509 Расчёт конструктивных параметров ножей для измельчения пророщенного зерна [Текст] / Вендин С.В., Саенко Ю.В., Мартынов Е.А., **Семернина М.А.** заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. – № 2019616509 дата регистрации 23.05.2019. Бюллетень № 6.

8. Программа для ЭВМ № 2021619705 Расчёт затрат энергии на измельчение пророщенного зерна [Текст] / Вендин С.В., Саенко Ю.В., Мартынов Е.А., Семернина М.А. заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ им. В.Я. Горина. – № 2021618778 дата регистрации 15.06.2021.

*Публикации в других изданиях и материалах конференций:*

9. Семернина, М.А. Обоснование конструктивных параметров ножей при резании плоского слоя продукта [Текст] / С.В. Вендин, В.А. Самсонов, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Вестник всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 4 (24). – С. 101-104.

10. Семернина, М.А. Дробилка пророщенного зерна на витаминный корм животным [Текст] / Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Материалы национальной международной научно-производственной конференции «Наука аграрному производству: актуальность и современность» (25 мая 2018 года). – Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. – С. 117-118.

11. Семернина, М.А. Измельчитель пророщенного зерна [Текст] / М.А. Семернина // Материалы XXIII международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее» (28-29 мая 2019 года): в 2 т. Том 1. – п. Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2019. – С. 102-103.

12. Семернина, М.А. Способы подготовки зерновых кормов к скармливанию [Текст] / М.А. Семернина // Материалы Национальной (всероссийской) научно-практической конференции с международным участием «АГРОИНЖЕНЕРИЯ В XXI ВЕКЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ» посвященной 30-летию инженерного факультета им. А.Ф. Пономарева. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2020. – С. 223-226.

13. Семернина, М.А. Обзор дробилок пророщенного зерна [Текст] / Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Материалы Национальной научно-практической конференции «Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке». Решения проблем взаимодействия науки и бизнеса п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2021. – С. 163-167.

14. Семернина, М.А. Новое в измельчении пророщенного зерна [Текст] / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, М.А. Семернина // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы национальной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2020. – С. 307-311.

15. Семернина, М.А. Новое в измельчении неоднородных материалов [Текст] / М.А. Семернина // Материалы XXIV Международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее» 27-28 мая 2020 года: в 2 т. Том 1. – п. Майский: Издательство ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2020. – С. 69-70.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре  
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ  
Подписано в печать 21.10.2021. Формат 60x84/16,  
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Ризограф  
Заказ № 20646

---

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ  
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101  
тел. +7 (47545) 3-88-34, доб. 211



