

Исследование эффективности работы центробежно-ударного измельчителя фуражного зерна новой конструкции

М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, А. В. Крупин, И. И. Максимов

Для подрібнення фуражного зерна використовують молотковідробарки, яким властиві висока питома витрата енергії та його нерівномірний фракційний склад. Отримання якісно подрібненого зерна з меншими енерговитратами можливо на відцентрово-ударному подрібнювачі нової конструкції з отвором в завантажувальній горловині для додаткової подачі повітря в камеру подрібнення зі швидкістю до 4,8 м/с. Додатковий отвір забезпечує підвищення швидкості повітря в вивантажній горловині в 1,8...13 разів при зміні частоти обертання ротора з 3750 до 2250 хв⁻¹, своєчасну евакуацію подрібненого матеріалу з подрібнювача.

Отримано рівняння регресії, що дозволяють визначити конструкційні та режимні параметри подрібнювача, що забезпечують максимум продуктивності та мінімум питомих енерговитрат. Найбільший вплив на продуктивність подрібнювача надають діаметри отворів решіт і площа вивантажного вікна бункера. Найбільший вплив на питому енергоємність процесу подрібнення надає діаметр отворів решета. Максимальна продуктивність подрібнювача – 1440 кг/год і мінімальна енергоємність з урахуванням досягнутого ступеня подрібнення 2,1 Вт·с/(кг·один. ст. вим.) Спостерігається при використанні решета з діаметром отворів 7 мм, частоті обертання ротора 3500 хв⁻¹ і максимально відкритому вивантажному вікні бункера при $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$. Питома витрата енергії на подрібнення ячменю менше в 1,22...1,89 рази, ніж у молоткових дробарок RVO 35, ДБ-5, КД-2А. Зміст пилоподібної фракції не перевищує 5,74 %, що в 2 рази менше, в порівнянні з молотковою дробаркою ДЗМ-6. Визначено раціональні режими роботи подрібнювача для підготовки фуражного зерна до згодовування для сільськогосподарських тварин різних видів і вікових груп.

Ключові слова: фуражне зерно, відцентрово-ударний подрібнювач, дерть, ступінь подрібнення зерна, подрібнювач зерна.

1. Введение

Современное животноводство, как потребитель, выдвигает всё более жёсткие требования к качеству кормов. Затраты на корма достигают 65...75 % от полных затрат на производство в свиноводстве и птицеводстве. Фуражное зерно – один из важнейших и наиболее дорогостоящих кормов для сельскохозяйственных животных. Его эффективное использование является одним из факторов, оказывающих влияние на продуктивность животных и на уровень затрат на их содержание.

Подготовка фуражного зерна к скармливанию включает его измельчение [1, 2] с получением дерти требуемого гранулометрического состава. Размер частиц скармливаемой животным дерти оказывает влияние на усвояемость питательных веществ, продуктивность и здоровье животных [3].

На большинстве предприятий для измельчения фуражного зерна используются молотковые дробилки, которые, несмотря на многочисленные достоинства, имеют два существенных недостатка. Первый – высокий удельный расход энергии – 6...15 кВт·ч на 1 т размола. Вторым недостатком – неравномерный фракционный состав измельченного продукта – содержание пылевидной фракции до 40 % при тонком помоле и до 20 % недоизмельченной фракции при грубом помоле [4].

Получить измельченный материал с выровненным гранулометрическим составом, соответствующим зоотехническим требованиям возможно при измельчении зерна на центробежно-ударных измельчителях [5, 6], при этом достигается удельный расход энергии в интервале 3,3...4,5 кВт·ч/т [6–8].

Основным недостатком этих измельчителей является значительное снижение качества измельчения, забивание рабочей камеры при увеличении подачи материала – свыше 1000 кг/ч. Это происходит по причинам несовершенства конструкции ротора и деки, слабого воздушного потока внутри камеры измельчения, который недостаточно способствует продвижению частиц материала от входа к выходу и очистке рабочих органов. В большинстве известных конструкций центробежных измельчителей удаление продуктов измельчения происходит в большей мере за счет действия центробежной силы, без участия силы тяжести.

Разработка центробежно-ударного измельчителя фуражного зерна производительностью свыше 1000 кг/ч, способного получать дерть, отвечающей зоотехническим требованиям для всех основных видов и половозрастных групп животных при снижении удельных энергетических затрат является актуальной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Зерно является не только одним из основных продуктов питания человека, но и важнейшим и незаменимым кормом для большинства сельскохозяйственных животных и птицы. По данным FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), мировой объём производства зерновых в 2019 году составил 2708,5 млн. т, в том числе 1446,2 млн. т – фуражное зерно, то есть 53,39 %. По прогнозу на 2020 год – 2790 млн. т, в том числе фуражное зерно 1519 млн. т (фуражное зерно 52,07 %) [9].

Существует много способов подготовки фуражного зерна к скармливанию – плющение, поджаривание, варка и запаривание, осолаживание, ферментирование, дрожжевание, экструдирование, микронизация, обработка в магнитном поле сверхвысокой частоты. Перечисленные способы подготовки зерна к скармливанию применяют с целью повышения кормовой ценности зерна и его обеззараживания, однако они не обеспечивают зоотехнических требований к размеру частиц. При применении этих способов зерно необходимо измельчать до или после его обработки.

Измельчение фуражного зерна является обязательной операцией и должно обеспечить получение однородного по гранулометрическому составу размола, с минимальным содержанием целых зёрен и пылевидной фракции [10]. Средний размер частиц измельчённого корма должен быть не минимально возможным, а оптимальным для данного вида и возраста животных. Скармливание кормов с большим содержанием пылевидной фракции опасно не только снижением усвояемости питательных веществ, но и может привести к различным заболеваниям и даже гибели животных [3].

Так, например, при скармливании свиньям на откорме корма со средним размером частиц 1,159 мм 67 % после убоя имели нормальный желудок без каких-либо заболеваний. При скармливании корма со средним размером частиц 0,711 мм у 50 % животных наблюдались эрозии желудка. При скармливании корма со средним размером частиц 0,456 мм у животных наблюдались уже не только эрозии, но и язвы желудка. При скармливании зерна, измельчённого в муку (средний размер частиц менее 0,25 мм), начинается падёж животных [3].

В мире для измельчения не менее чем 95 % всего фуражного зерна используют различные молотковые дробилки, отличающиеся технологическими, кинематическими и конструкционными параметрами [11–13]. Молотковые дробилки имеют существенный недостаток – высокий удельный расход энергии. Так, например, дробилка ДБ-5 (Россия) и её аналоги – АКР-1 (Россия), ДКМ-5 (Россия) при мощности электродвигателя 30 кВт имеют производительность до 5 т/ч, удельный расход энергии не менее 6 кВт ч/т; дробилка КДУ-2 (Россия) и её аналоги КД-2А (Россия), КДМ-2 (Россия) имеет производительность до 3 т/ч при мощности электродвигателя 22 кВт – удельный расход энергии не менее 7,33 кВт·ч/т [14, 15]. Одной из лучших в своем сегменте является NEUERO RVO 35 (Германия): имеет производительность до 1,585 т/ч при мощности электродвигателя 7,5 кВт – удельный расход энергии не менее 4,73 кВт·ч/т [16]. Используемые на крупных комбикормовых предприятиях дробилки А1-ДМР-12 (Россия) и Van Aarsen НМ-700-2D (Нидерланды) имеют производительность до 12 т/ч при мощности электродвигателя 110 кВт – удельный расход энергии не менее 9,17 кВт·ч/т [17].

Пневматические молотковые дробилки обеспечивают пневмоподачу зерна через эжектор и всасывающий пневмомассопровод в рабочую камеру и пневмотранспорт измельченного продукта через нагнетательный пневмомассопровод. Они не требуют применения периферийных конвейеров, но имеют больший удельный расход энергии. Так, дробилка КУ-203 (Россия) имеет максимальную производительность 2,5 т/ч при установленной мощности электродвигателя 22 кВт [18] – удельный расход энергии не менее 8,8 кВт ч/т; дробилка ДПМ-18,5 (Россия) имеет максимальную производительность 2,1 т/ч при установленной мощности электродвигателя 18,5 кВт [19] – удельный расход энергии не менее 8,8 кВт ч/т, а DOZAMEH H-119/3 (Польша) имеет максимальную производительность 2 т/ч при установленной мощности электродвигателя 18,5 кВт – удельный расход энергии не менее 9,25 кВт ч/т [20].

Также молотковым дробилкам свойственны неоднородность гранулометрического состава размола, высокая металлоёмкость конструкции, значительные затраты на ремонт вследствие малого ресурса рабочих органов.

Получение качественно измельченного зерна при минимальных энергозатратах возможно на центробежно-ударных измельчителях, ротор которых имеет неподвижно закрепленные лопатки, а внутри рабочей камеры, вокруг ротора, расположены решето и дека с отбойниками. И молотковые, и центробежно-ударные измельчители, обеспечивают разрушение зерна свободным ударом. Принципиальным отличием является то, что в молотковых дробилках удар наносится по зерну движущимся по окружности шарнирно подвешенным к ротору молотком. В центробежно-ударном измельчителе лопаткой ротора зерно разгоняется до скорости 80...100 м/с и разрушается от удара о неподвижный отбойник на деке. В этом случае разрушение зерна происходит значительно эффективнее, чем измельчении свободными ударами молотков [5, 6]. При этом получается измельченный материал с более выровненным гранулометрическим составом, соответствующим зоотехническим требованиям, а удельный расход энергии составляет 3,3 ...4,5 кВт·ч/т [6–8].

Известен центробежный измельчитель фуражного зерна [21], включающий корпус с выгрузной горловиной, крышку с загрузочным бункером и подвижным шибером и электродвигатель. В корпусе, непосредственно на валу электродвигателя, закреплён ротор с плоскими лопатками с возможностью установки их под углом от 0° до 45° к диаметру ротора по направлению вращения ротора. Внутри корпуса при помощи шести плоских кронштейнов, вокруг ротора, установлены плиты с отбойниками и решета с отверстиями необходимого диаметра. Недостатками этого измельчителя являются:

- наличие двух плит с отбойниками и шести плоских кронштейнов существенно снижает площадь живого сечения отверстий решета, что ухудшает эвакуацию измельчённого продукта из рабочей камеры и снижает пропускную способность измельчителя;

- у компактных измельчителей с небольшим диаметром ротора, который крепится непосредственно на валу приводного электродвигателя, сложно достичь скорости движения зёрен по лопаткам ротора, достаточной для их измельчения при ударе об отбойники;

- использование отбойников с квадратным сечением и ротора измельчителя с радиально расположенными на нем лопатками приводит к снижению интенсивности процесса измельчения, т. к. соударение частиц с отбойниками происходит не под прямым углом;

- пространство между отбойниками квадратного сечения забивается частицами материала, что приводит к снижению пропускной способности и увеличению затрат труда на очистку.

Известен центробежный измельчитель фуражного зерна [22], по конструкции аналогичный предыдущему, имеющий механизм, позволяющий выдвигать лопатки ротора по мере их износа и регулировать интенсивность измельчения. Однако это техническое решение приводит к усложнению конструкции ротора,

увеличению затрат труда на обслуживание измельчителя и высокой вероятности возникновения дисбаланса ротора.

К общим основным недостаткам известных центробежно-ударных измельчителей следует отнести значительное снижение качества измельчения, забивание рабочей камеры при увеличении подачи материала. Это происходит по причинам слабого воздушного потока внутри камеры измельчения, который недостаточно способствует продвижению частиц материала от входа к выходу и очистке рабочих органов. Кроме того, ось выгрузного патрубка отклонена от вертикального положения, и удаление продуктов измельчения происходит, в большей мере, за счет действия центробежной силы, без участия силы тяжести.

Несовершенство конструкции, недостаточная изученность процесса работы центробежно-ударных измельчителей сдерживает их широкое практическое применения в народном хозяйстве.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является выявление закономерностей влияния конструктивно-технологических параметров измельчителя новой конструкции на показатели эффективности процесса измельчения зерна.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- установить влияние частоты вращения ротора и наличия отверстия для отбора воздуха и подачи в камеру измельчения в загрузочном патрубке на скорость воздуха в выгрузной горловине измельчителя;
- построить уравнения регрессии, описывающие влияние частоты вращения ротора, диаметра отверстий решета, площади выгрузного окна бункера на производительность и удельную энергоемкость процесса измельчения ячменя;
- оценить качество измельчения фуражного зерна центробежно-ударным измельчителем и определить рациональные режимы его работы при измельчении фуражного зерна для животных различных видов и возрастов.

4. Материалы и методы исследования центробежного измельчителя фуражного зерна

Исследование проводили на центробежно-ударном измельчителе фуражного зерна [23], содержащем станину 1 (рис. 1) к которой крепится рабочая камера 2. В рабочей камере находятся решето 3, ротор 4 с плоскими лопатками, повернутыми по направлению вращения к диаметру ротора на 10° , и дека 5 с отбойниками трапециевидного сечения. Решето и дека крепятся к кронштейнам 6. К выгрузной горловине 7, располагающейся в нижней части рабочей камеры, крепится съемный фильтр-мешок 8. Бункер 9 с регулировочной заслонкой 10 загрузочной горловиной 12 крепятся к передней стенке рабочей камеры. В загрузочной горловине имеется отверстие отбора воздуха для подачи в камеру измельчения с шиберной задвижкой 11. Приводной вал ротора располагается в корпусе подшипников 13. привод осуществляется от электродвигателя 15, управляемого частотным регулятором, через клиноременную передачу 14.

Техническая задача измельчения фуражного зерна с получением качественного размола, соответствующего зоотехническим требованиям

при минимальных затратах энергии на процесс с максимальной пропускной способностью решена путем:

- установки плоских лопаток на роторе с углом наклона к диаметру ротора по направлению его вращения 10° ;
- рационального размещения и крепления деки с отбойниками и решета при помощи всего двух кронштейнов;
- применения отбойников трапецевидного сечения;
- вырезки отверстия в загрузочной горловине для отбора воздуха и подачи в камеру измельчения;
- вертикального ориентирования оси выгрузной горловины камеры измельчения.

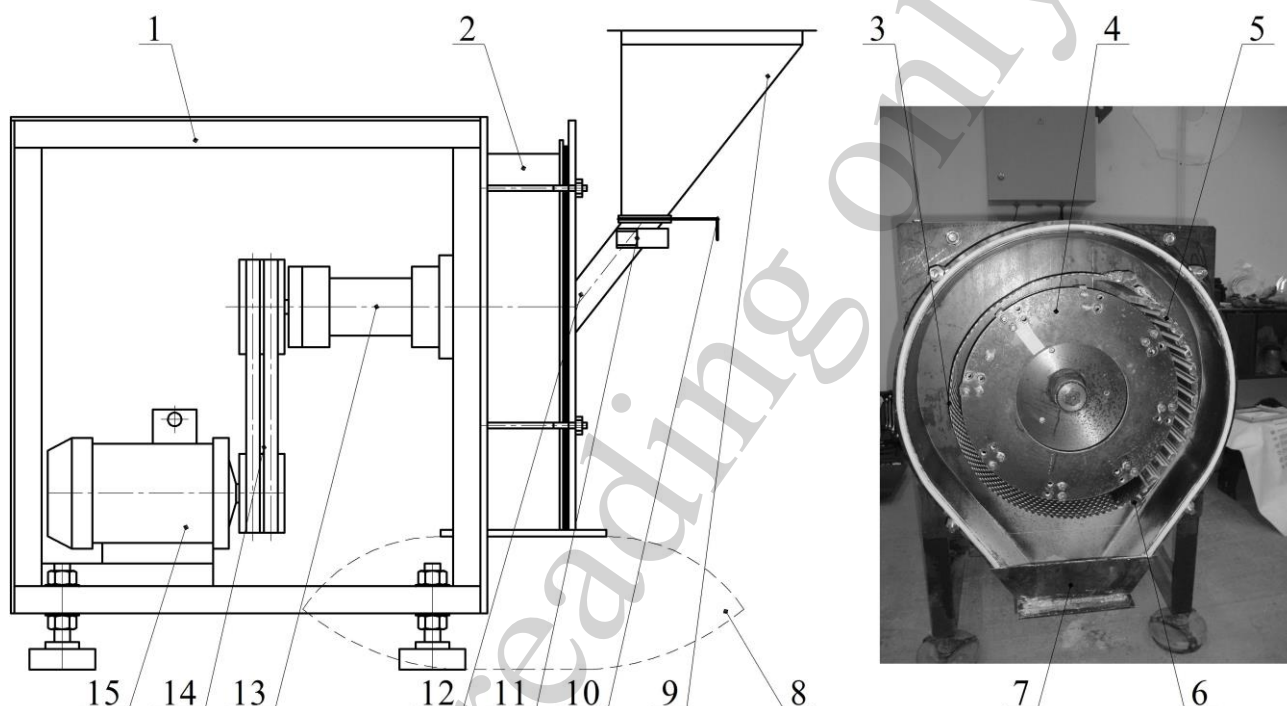


Рис. 1. Измельчитель фуражного зерна: 1 – станина; 2 – камера рабочая; 3 – решето; 4 – ротор; 5 – дека; 6 – кронштейн; 7 – горловина выгрузная; 8 – фильтр-мешок; 9 – бункер; 10 – заслонка регулировочная; 11 – отверстие с шиберной задвижкой; 12 – горловина загрузочная; 13 – корпус подшипников; 14 – передача клиноременная; 15 – электродвигатель

Измельчитель работает следующим образом. Подача зерна осуществляется из бункера самотеком через загрузочную горловину при открытии регулировочной заслонки и шиберной задвижки. При этом через отверстие в стенке загрузочной горловины обеспечивается поступление воздуха в рабочую камеру. Зерно при движении по лопатке вращающегося ротора разгоняется до скорости $80 \dots 100$ м/с и, при сходе с лопатки, направляется на дека, где происходит его измельчение при ударе об отбойники.

Образовавшиеся при разрушении зерен частицы потоком воздуха выносятся сквозь отверстия решета в выгрузную горловину и покидают рабочую камеру.

Если размер измельченных частиц велик для прохода сквозь отверстия решета, то они, вращаясь в воздушно-продуктовом слое, подвергаются повторным ударам об отбойники деки до тех пор, пока не измельчатся до требуемой величины.

Исследование эффективности работы центробежно-ударного измельчителя проводили на ячмене сорта «Гонар», в соответствии с планом Бокса-Бенкина был реализован трехфакторный трехуровневый эксперимент.

Параметром оптимизации (рис. 2) являлась удельная энергоемкость, E , Вт·с/(кг·ед.ст.изм.), которая определялась по зависимости:

$$E = \frac{N}{Q \cdot \lambda}, \quad (1)$$

где N – потребляемая мощность, Вт;

Q – производительность измельчителя, кг/с;

λ – степень измельчения.

В качестве основных варьируемых факторов приняты:

n – частота вращения ротора, мин⁻¹;

d – диаметр отверстий решета, м;

F – площадь выгрузного окна бункера, м².

Контролируемые факторы: влажность зерна, ω , %; δ – начальный размер зерна, м; γ – объёмная масса зерна, кг/м³.

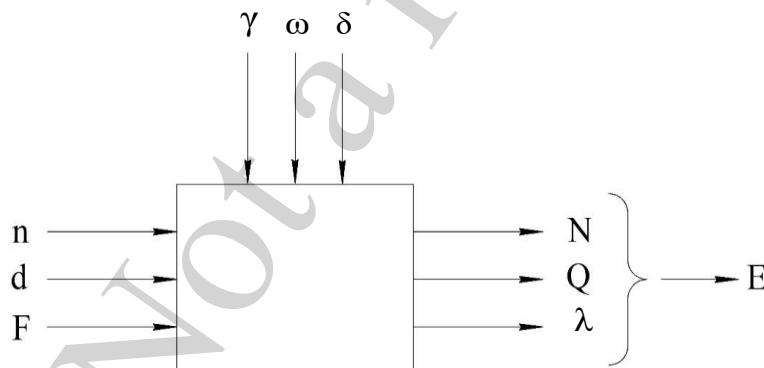


Рис. 2. Моделирование процесса измельчения зерна

Уровни варьирования факторов и их кодированное обозначение представлены в табл. 1. Выбор уровней варьирования факторов n и F определялся техническими возможностями конструкции измельчителя, а для фактора d – технологическими и зоотехническими требованиями к измельченному продукту.

При проведении опытов при измельчении зерна дерть поступала в фильтр-мешок 8 (рис. 1).

Повторность проведения опытов изменяли от 3 до 7, чтобы относительная гарантийная ошибка опыта не превышала 10 %.

Лабораторные исследования проводили с целью определения рациональных технологических параметров работы центробежно-ударного измельчителя

новой конструкции. Для проведения исследований установка была оснащена всеми необходимыми приборами и системами в соответствии с общепринятыми методиками.

Таблица 1
Уровни варьирования факторов

| Уровень варьирования | Частота вращения ротора, n , $\text{мин}^{-1} \cdot 10^3$ | Диаметр отверстий решета, d , м | Площадь выгрузного окна бункера, F , $\text{м}^2 \cdot 10^{-3}$ |
|----------------------|---|-----------------------------------|---|
| Нижний | 2,5 | 0,004 | 0,702 |
| Нулевой | 3,0 | 0,006 | 1,08 |
| Верхний | 3,5 | 0,008 | 1,458 |

Дерть высыпалась из фильтр-мешка, проводился отбор пробы массой 100 г и ее рассев на ситовом анализаторе (рис. 2, а). Использовались сита с диаметром отверстий сит 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,25 мм и дно. Сход с каждого сита взвешивался на весах (рис. 2, б).

Средний диаметр зерна и частиц измельченного материала определялся на основе анализа данных гранулометрического состава по формуле:

$$d_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot p_i}{100} = \frac{d_1 \cdot p_1 + d_2 \cdot p_2 + \dots + d_n \cdot p_n}{100}, \quad (2)$$

где d_i – средний размер отверстий двух смежных сит, мм; p_i – весовой выход (масса) класса, %.

Степень измельчения материала определялась как отношение среднего диаметра частиц исходного материала (зерна) к среднему диаметру частиц измельченного материала:

$$\lambda = \frac{D_{\text{з}}}{d_{\text{cp}}}, \quad (3)$$

где λ – степень измельчения материала; $D_{\text{з}}$ – средний диаметр зерна, мм; d_{cp} – средний диаметр частиц измельченного материала, мм.

Потребляемая электродвигателем мощность измерялась ваттметром. Производительность центробежно-ударного измельчителя определялась методом отсечек, при этом по секундомеру измерялось время измельчения определенной массы зерна, затем вычислялось их отношение.

5. Результаты исследований эффективности работы разработанного центробежно-ударного измельчителя зерна

Проведенные экспериментальные исследования по установлению влияния частоты вращения ротора и наличия отверстия для отбора воздуха и подачи в камеру измельчения в загрузочном патрубке на скорость воздуха в выгрузной

горловине измельчителя (табл. 2) показали следующее. При работе измельчителя с закрытым отверстием в загрузочной горловине воздух в камеру измельчения поступает вместе с зерном из бункера и посредством фильтрации сквозь зерновой слой в бункере. При этом, максимальная скорость воздуха в выгрузной горловине при частоте вращения ротора 3750 мин^{-1} составляет $2,7 \text{ м/с}$. Отверстие в загрузочном патрубке позволяет увеличить скорость воздуха в выгрузной горловине до $4,8 \text{ м/с}$.

Таблица 2
Скорость воздуха в выгрузной горловине, м/с

| № | Показатель. Условие проведения опыта | Частота вращения ротора, $\text{мин}^{-1} \cdot 10^3$ | | | | | | |
|---|--|---|------|------|------|------|------|------|
| | | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 | 3,25 | 3,50 | 3,75 |
| 1 | Скорость воздуха, v_1 , м/с. Отверстие в загрузочном патрубке закрыто | 0,2 | 0,3 | 0,8 | 1,7 | 2 | 2,4 | 2,7 |
| 2 | Скорость воздуха, v_2 , м/с. Отверстие в загрузочном патрубке открыто | 2,6 | 2,7 | 3,1 | 3,3 | 3,8 | 4,5 | 4,8 |
| 3 | Увеличение скорости, v_2/v_1 | 13,0 | 9,0 | 3,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 |

Статистическую обработку данных экспериментального исследования эффективности работы центробежно-ударного измельчителя зерна проводили с использованием универсального пакета программы STATGRAPHICS® Centurion XV.

Проведенный многофакторный регрессионный анализ по определению влияния частоты вращения ротора n , диаметра отверстий решета d , площади выгрузного окна бункера F на производительность измельчителя Q позволил получить математическую модель

$$Q = -4711,75 - 75,14 \cdot d - 2473,10 \cdot F^2 + 434,85 \cdot n + 1055,87 \cdot d + 1037,93 \cdot F + 105,14 \cdot d \cdot F - 23,98 \cdot d \cdot n. \quad (4)$$

Из дисперсионного анализа уравнения регрессии следует, что модель информативно способна т. к. коэффициент детерминации параметра n достаточно велик и составляет $98,60 \%$, полученная модель объясняет $98,60 \%$ изменения n . Модель значима, существует статистически значимое отношение между переменными на уровне 95% .

С использованием полученного уравнения регрессии на рис. 3 приведена графическая иллюстрация зависимости производительности измельчителя от варьируемых факторов n , d и F .

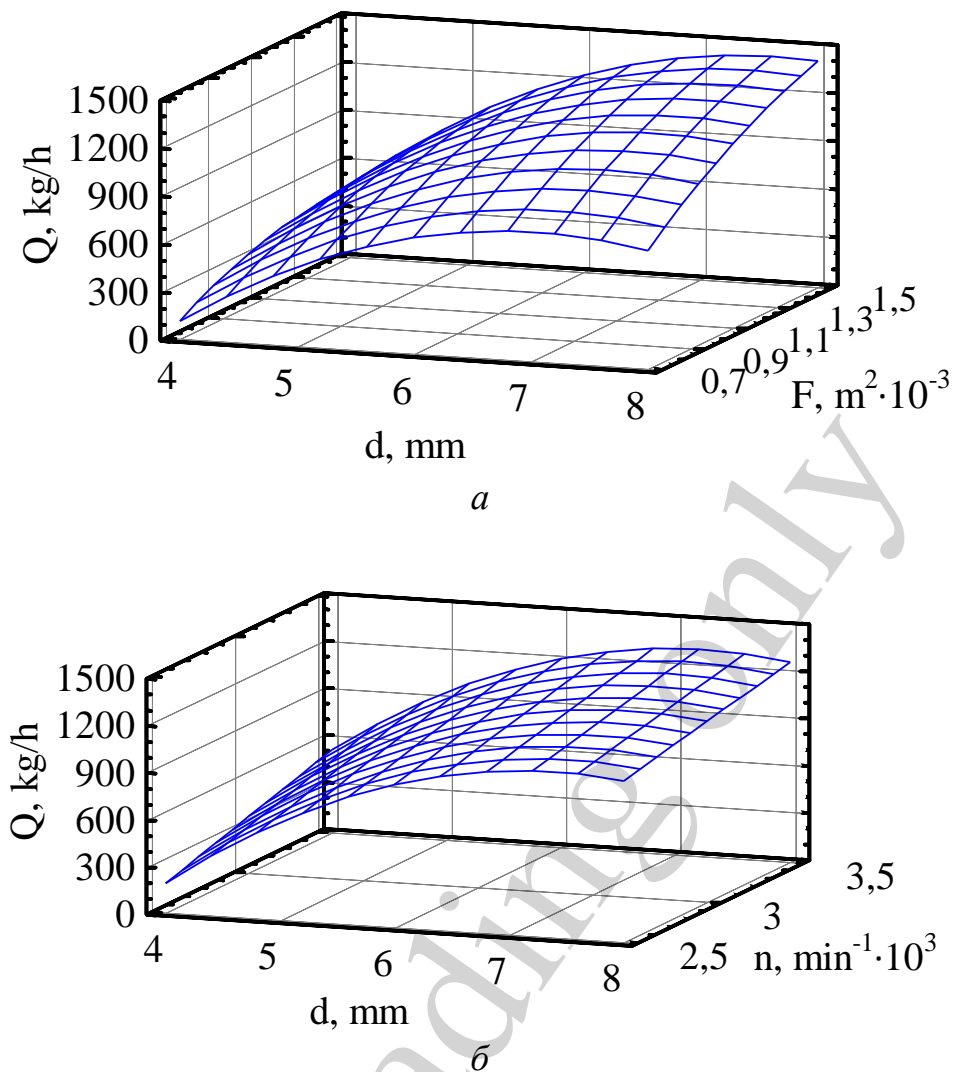


Рис. 3. Зависимость производительности измельчителя: *a* - от диаметра отверстий решета и частоты вращения ротора; *б* – от диаметра отверстий решета и площади выгрузного окна бункера

Проведенный многофакторный регрессионный анализ по определению влияния частоты вращения ротора n , диаметра отверстий решета d , площади выгрузного окна бункера F на удельную энергоёмкость E позволил получить математическую модель

$$E = 23,67 + 0,19 \cdot d^2 + 0,49 \cdot F^2 - 4,01 \cdot n - 3,58 \cdot d - 0,07 \cdot F - 0,28 \cdot d \cdot F + 0,41 \cdot d \cdot n . \quad (5)$$

Из дисперсионного анализа уравнения регрессии следует, что модель информационно способна т. к. коэффициент детерминации параметра n достаточно велик и составляет 95,92 %, полученная модель объясняет 95,92 % изменения n . Модель значима, существует статистически значимое отношение между переменными на уровне 95 %. На рис. 4 представлены линии равных откликов удельной энергоёмкости измельчения зерна в факторном пространстве n - d и F - d .

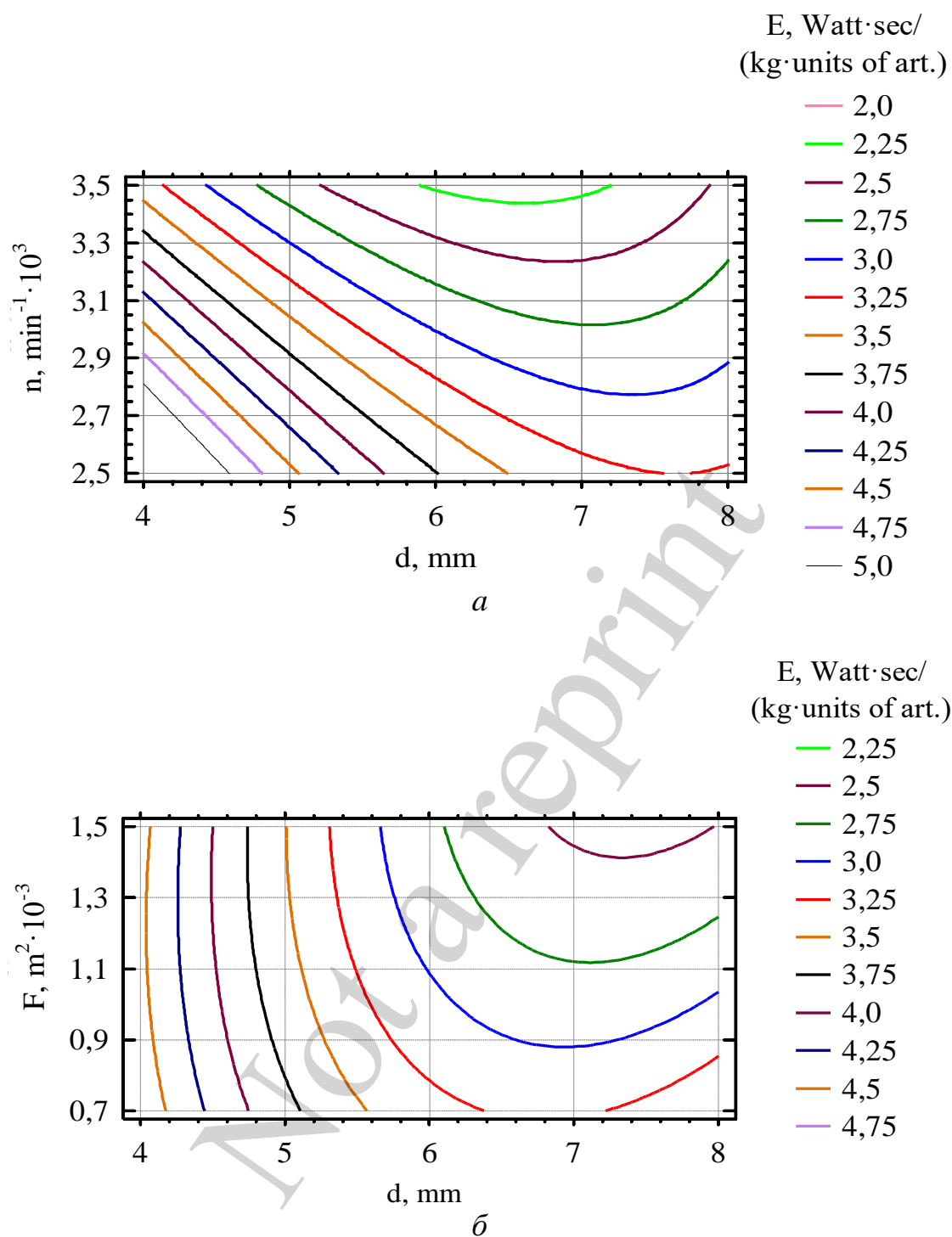


Рис. 4. Зависимость удельной энергоёмкости измельчения зерна: *а* – от диаметра отверстий решета и частоты вращения ротора, *б* – от диаметра отверстий решета и площади выгрузного окна бункера

Показатели качества фуражного зерна, скормливаемого животным различных видов и возрастов в составе рассыпных комбикормов, регламентируются межгосударственными стандартами. Сводные требования к размерам частиц дерти для различных видов и половозрастных групп животных приведены табл. 3. Однако приведенные сведения не регламентируют средний размер частиц дерти. Исследованиями ученых в США [3, 24] опти-

мальный размер частиц корма для молодняка свиней на откорме определен в пределах 0,5...0,9 мм. Рекомендации российских ученых [25, 26] близки – для поросят-сосунов 0,5...0,8 мм, для поросят-отъемышей 0,9...1,1 мм, а для других групп свиней 1...1,4 мм.

Таблица 3
Требования к размерам частиц дерти

| № п/п | Наименование половозрастных групп животных | Массовая доля остатка на сите, %, не более | |
|-------|---|--|------------------------|
| | | диаметр отверстий 5 мм | диаметр отверстий 3 мм |
| 1 | Телята и молодняк КРС до 18 мес. | 2 | 10 |
| 2 | Молочные коровы, нетели, быки-производители и КРС на откорме | 5 | 25 |
| 3 | Ягнята до 4 мес. и козлята до 3 мес. | 0 | 2 |
| 4 | Взрослые животные и молодняк овец свыше 4 мес. и коз свыше 3 мес. | 5 | 12 |
| 5 | Поросята-сосуны до 2 мес. и поросята-отъемыши от 2 до 4 мес. | 0 | 5 |
| 6 | Свиноматки, хряки-производители и свиньи на откорме | 1 | 5 |

Результаты ситового анализа дерти, полученной при проведении опытов, представлены в табл. 4.

Таблица 4
Гранулометрический состав дерти

| № опыта | Диаметр отверстий решета, мм | Частота вращения ротора, мин ⁻¹ · 10 ³ | Площадь окна бункера, м ² · 10 ⁻³ | Остаток на лабораторных ситах, % | | | | | | | Средний размер частиц, d _{ср} , мм |
|---------|------------------------------|--|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|------|---|
| | | | | Диаметр отверстий лабораторных сит, мм | | | | | | | |
| | | | | 5 | 3 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0 | |
| 1 | 4 | 2,5 | 1,08 | 0 | 1,13 | 23,41 | 46,82 | 14,18 | 10,42 | 4,04 | 1,48 |
| 2 | 4 | 3,0 | 0,702 | 0 | 0,26 | 9,47 | 53,95 | 15,96 | 14,63 | 5,74 | 1,24 |
| 3 | 4 | 3,0 | 1,458 | 0 | 0,63 | 14,89 | 50,18 | 20,31 | 10,73 | 3,26 | 1,35 |
| 4 | 4 | 3,5 | 1,08 | 0 | 0,26 | 7,8 | 51,68 | 32,85 | 6,36 | 1,04 | 1,25 |
| 5 | 6 | 2,5 | 0,702 | 0,39 | 21,39 | 35,41 | 28,32 | 9,78 | 3,89 | 0,82 | 2,28 |
| 6 | 6 | 2,5 | 1,458 | 0,28 | 31,72 | 32,59 | 23,99 | 8,04 | 2,79 | 0,58 | 2,53 |
| 7 | 6 | 3,0 | 1,08 | 0,25 | 16,82 | 38,84 | 29,54 | 6,72 | 6,13 | 1,7 | 2,18 |
| 8 | 6 | 3,0 | 1,08 | 0,31 | 16,34 | 40,89 | 30,3 | 5,92 | 4,81 | 1,43 | 2,22 |
| 9 | 6 | 3,0 | 1,08 | 0,32 | 16,54 | 38,18 | 30,34 | 8,4 | 5,21 | 1,01 | 2,17 |
| 10 | 6 | 3,5 | 0,702 | 0 | 8,54 | 30,5 | 37,34 | 12,71 | 8,64 | 2,27 | 1,79 |
| 11 | 6 | 3,5 | 1,458 | 0,11 | 11,98 | 32,56 | 37,03 | 10,29 | 6,17 | 1,87 | 1,96 |
| 12 | 8 | 2,5 | 1,08 | 0,47 | 40,61 | 32,14 | 18,99 | 4,69 | 2,48 | 0,63 | 2,79 |
| 13 | 8 | 3,0 | 0,702 | 0,49 | 23,6 | 38,85 | 26,87 | 5,43 | 3,87 | 0,88 | 2,4 |
| 14 | 8 | 3,0 | 1,458 | 0,47 | 27,35 | 35,04 | 27,76 | 5,48 | 3,2 | 0,79 | 2,45 |
| 15 | 8 | 3,5 | 1,08 | 0,36 | 22,08 | 41,23 | 29,48 | 3,83 | 2,26 | 0,76 | 2,42 |

6. Обсуждение результатов исследований разработанного центробежного измельчителя фуражного зерна

Проблема снижения пропускной способности измельчителя и забивания рабочей камеры материалом решается наличием отверстия для отбора воздуха в загрузочной бункера и вертикальной ориентацией оси выгрузной горловины. При закрытом отверстии загрузочной горловины подача воздуха в рабочую камеру происходила за счет его фильтрации сквозь слой зерна в бункере. Это не обеспечивало поступления воздуха в рабочую камеру в нужном количестве. Соответственно и скорость движения воздуха в рабочей камере была невелика – в выгрузной горловине она составляла 0,2...2,7 м/с (табл. 2). При открытом отверстии загрузочной горловины скорость воздуха в выгрузной горловине увеличивается в 1,8...13 раз в зависимости от частоты вращения ротора и достигает 4,8 м/с. Скорость витания продуктов измельчения большинства сельскохозяйственных материалов размерами 0,25...1,5 мм находится в диапазоне 1,0...3,5 м/с. Поэтому подача воздуха в камеру измельчения через отверстие в загрузочной горловине и вертикальная ориентация оси выгрузной горловины гарантируют улучшение эвакуации измельченного материала. Обеспечивается стабильное продвижение частиц измельченного материала к выходу и очистка рабочих органов измельчителя за счет постоянного потока воздуха с достаточной скоростью. Это способствует повышению производительности, получению размола заданного гранулометрического состава и повышению эксплуатационной надежности измельчителя.

Полученные уравнения регрессии (4) и (5) позволяют определить конструкционные и режимные параметры, которые обеспечивают максимум производительности и минимум удельных энергозатрат.

Наибольшее влияние на производительность измельчителя оказывают диаметр отверстий решет и площадь выгрузного окна бункера. Производительность интенсивно возрастает – с 100 до 1422 кг/ч при увеличении диаметра отверстий решета с 4 до 6 мм (рис. 3). Максимальные значения производительности наблюдаются при площади выгрузного окна бункера $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$, обеспечивающей максимально возможную подачу зерна из бункера в рабочую камеру. Влияние частоты вращения ротора на производительность уменьшается с увеличением диаметра отверстий решета.

Принимая во внимание значения коэффициентов полученной математической модели, анализируя характер линий равных откликов (рис. 4), замечаем, что наибольшее влияние на удельную энергоёмкость процесса измельчения оказывает диаметр отверстий решета. Минимальная энергоёмкость с учетом достигнутой степени измельчения 2,1 Вт·с/(кг·ед.ст.изм.) наблюдается при использовании решета с диаметром 7 мм, частоте вращения ротора 3500 мин⁻¹ и максимально открытом выгрузном окне бункера.

Анализ гранулометрического состава дерти (табл. 4) показывает, что средний размер частиц дерти уменьшается с уменьшением диаметра отверстий решета и площади выгрузного окна бункера, при одновременном увеличении частоты вращения ротора.

Средний размер дерти, полученной в опытах № 1...4, при измельчении с использованием решета с диаметром отверстий 4 мм составляет 1,24–1,48 мм. Это соответствует требованиям для всех половозрастных групп свиней, а также для ягнят, козлят и телят. Наименьшие удельные затраты и максимальная производительность – 543 кг/ч будут при $n=3500 \text{ мин}^{-1}$, $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$.

Средний размер дерти, полученной в опытах № 10 и 11, при измельчении с использованием решета с диаметром отверстий 6 мм составляет 1,79–1,96 мм. Это соответствует требованиям для молочных коров, нетелей, быков-производителей и КРС на откорме, а также для взрослых овец и коз. Наименьшие удельные затраты и максимальная производительность – 1422 кг/ч будут при $n=3500 \text{ мин}^{-1}$, $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$.

Средний размер дерти, полученной в опытах № 13 и 15, при измельчении с использованием решета с диаметром отверстий 8 мм составляет 2,4–2,42 мм. Это соответствует требованиям для молочных коров, нетелей, быков-производителей и КРС на откорме. Наименьшие удельные затраты и максимальная производительность – 1385 кг/ч будут при $n=3500 \text{ мин}^{-1}$, $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$.

Определенные в результате проведенного научного исследования рациональные режимы работы обеспечивают получение дерти требуемого гранулометрического состава для всех основных видов и половозрастных групп животных.

Сравнение эффективности работы центробежно-ударного измельчителя и существующих молотковых следует проводить с учетом ранее указанных основных недостатков молотковых дробилок – низкой энергоэффективностью и неравномерным гранулометрическим составом получаемой дерти.

При мощности электродвигателя 5,5 кВт ударно-центробежный измельчитель имеет производительность до 1,422 т/ч, удельный расход энергии 3,87 кВт·ч/т, что меньше в 1,22...1,89 раза, чем у молотковых дробилок RVO 35, ДБ-5, КД-2А [14–16], в 2,37 раза меньше чем у дробилок А1-ДМР-12 и Van Aarsen НМ-700-2D [17].

Центробежно-ударный измельчитель обеспечивает получение дерти с содержанием пылевидной фракции в существенно меньшем количестве по сравнению с молотковыми дробилками. При измельчении ячменя с использованием решета с диаметром отверстий 4 мм на молотковой дробилке ДЗМ-6 [27] получена дерть с содержанием 11,52 % фракции менее 0,2 мм. На новом измельчителе в опытах № 1...4 содержание фракции размером до 0,25 мм в дерти составило менее 5,74 %.

Особенности новой конструкции центробежно-ударного измельчителя открывают возможности его использования на предприятиях с различным поголовьем животных для работы с различными периферийными устройствами или в существующих поточно-технологических линиях производства комбикормов. Низкая удельная энергоемкость измельчения и высокое качество дерти обеспечивают снижение затрат на приготовление фуражного зерна к скармливанию животным и как следствие высокую конкурентную способность измельчителя.

К недостаткам новой конструкции центробежно-ударного измельчителя, в сравнении с пневматическими дробилками [18–20], можно отнести то, что для

загрузки зерном и выгрузки дерти из измельчителя требуются дополнительно транспортеры и согласование их производительности.

К достоинствам проведенного исследования, в сравнении с результатами известных исследований [7, 8, 29], следует отнести всесторонний анализ эффективности работы измельчителя. В исследовании производительность рассматривается в совокупности с энергоэффективностью и с качеством измельчения зерна. Именно совокупное рассмотрение всех аспектов эффективности работы измельчителя позволяет определить рациональные режимы работы и судить о преимуществах его использования в условиях сельскохозяйственного производства.

Приведенные результаты исследования являются продолжением – очередным этапом авторской работы в области разработки нового оборудования для механизации животноводства [28]. В дальнейшем возможно использование результатов данных исследований для обоснования и создания измельчителя с системами автоматической подачи зерна на измельчение и выгрузки дерти.

Недостатком проведенного исследования является выявление закономерностей влияния конструктивно-технологических параметров измельчителя новой конструкции на показатели эффективности процесса измельчения только ячменя. Для измельчителя, используемого в сельском хозяйстве и комбикормовой промышленности, очень важна универсальность, то есть способность измельчать все виды зерна и различных добавок – шроты, жмыхи и т. п. Кроме того, при исследовании не использовалось решето с диаметром отверстий 3 мм для получения дерти со средним размером частиц менее 1 мм, не исследовалась возможность применения в измельчителе сетчатых решет. Поэтому исследование целесообразно развивать в направлении выявления эффективности измельчения различных видов концентрированных кормов с использованием различных решет.

7. Выводы

1. Дополнительная подача воздуха в камеру измельчения через отверстие в загрузочной горловине повышает скорость воздуха в выгрузной горловине в 1,8...13 раз при изменении частоты вращения ротора с 3750 до 2250 мин⁻¹. Скорость воздуха в выгрузной горловине при рациональной частоте вращения ротора – 3750 мин⁻¹ достигает 4,8 м/с, превышает скорость витания продуктов измельчения большинства сельскохозяйственных материалов, обеспечивает своевременный вывод частиц измельченного материала из измельчителя.

2. Полученные уравнения регрессии (4) и (5) позволили определить конструкционные и режимные параметры, обеспечивающие максимум производительности и минимум удельных энергозатрат.

Максимальная производительность измельчителя – 1440 кг/ч и минимальная энергоёмкость с учетом достигнутой степени измельчения 2,1 Вт·с/(кг·ед.ст.изм.) наблюдается при использовании решета с диаметром 7 мм, частоте вращения ротора 3500 мин⁻¹ и максимально открытом выгрузном окне бункера при $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$.

Удельный расход энергии на измельчение ячменя меньше в 1,22...1,89 раза чем у молотковых дробилок RVO 35, ДБ-5, КД-2А.

3. Средний диаметр частиц дерти имеет выровненный состав и находится в пределах от 1,23 мм до 2,74 мм. Содержание пылевидной фракции в дерти при использовании решета с диаметром отверстий 4 мм составило менее 5,74 %, что в 2 раза меньше, по сравнению с молотковой дробилкой ДЗМ-6.

При подготовке зерна к скармливанию необходимо настраивать центробежно-ударный измельчитель с учетом вида и возраста животных

Для всех половозрастных групп свиней, а также для ягнят, козлят и телят установить решето с диаметром отверстий 4 мм, частоту вращения ротора $n=3500 \text{ мин}^{-1}$, регулировочную заслонку бункера открыть до величины площади выгрузного окна $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$.

Для молочных коров, нетелей, быков-производителей и КРС на откорме, а также для взрослых овец и коз, установить решето с диаметром отверстий 6 мм, частоту вращения ротора $n=3500 \text{ мин}^{-1}$, регулировочную заслонку бункера открыть до величины площади выгрузного окна $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$.

Для молочных коров, нетелей, быков-производителей и КРС на откорме установить решето с диаметром отверстий 8 мм, частоту вращения ротора $n=3500 \text{ мин}^{-1}$, регулировочную заслонку бункера открыть до величины площади выгрузного окна $F=1,458 \text{ м}^2 \cdot 10^{-3}$.

Литература

1. Lebedev, A. T., Pavlyuk, R. V., Zaharin, A. V., Lebedev, P. A. (2016). Providing for quality grinding grain for the implementation of the biological potential of productive animals. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 7 (2), 513–516. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43198352>
2. Savinyh, P., Kazakov, V., Moshonkin, A., Ivanovs, S. (2019). Investigations in feeding device of grain crusher. 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings. doi: <https://doi.org/10.22616/erdev2019.18.n165>
3. Healy, B. J., Hancock, J. D., Kennedy, G. A., Bramel-Cox, P. J., Behnke, K. C., Hines, R. H. (1994). Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum for nursery pigs. *Journal of Animal Science*, 72 (9), 2227–2236. doi: <https://doi.org/10.2527/1994.7292227x>
4. Семенихин, А. М., Гуриненко, Л. А., Иванов, В. В., Шкондин, В. Н. (2014). Особенности деформации зерна рабочими органами измельчителей. *Научный журнал КубГАУ*, 97 (03). URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/03/pdf/03.pdf>
5. Marczuk, A., Blicharz-Kania, A., Savinykh, P. A., Isupov, A. Y., Palichyn, A. V., Ivanov, I. I. (2019). Studies of a Rotary–Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method. *Sustainability*, 11 (19), 5362. doi: <https://doi.org/10.3390/su11195362>
6. Абалихин, А. М., Лапшин, В. Б. (2013). Мельница ударно-центробежного действия для измельчения фуражного зерна. *Аграрный вестник Верхневолжья*, 2 (3), 42–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20501852>

7. Золотарев, А. М., Труфанов, В. В., Дружинин, Р. А., Яровой, М. Н. (2018). К обоснованию рациональных режимных параметров ударно-центробежной дробилки. Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 1 (56), 119–127. doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.1.119>
8. Созонтов, А. В. (2018). Исследование и оптимизация рабочего процесса дробилки зерна ударного действия. Вестник НГИЭИ, 6 (85), 27–36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-i-optimizatsiya-rabocheho-protsesta-drobilki-zerna-udarnogo-deystviya/viewer>
9. Публикуемая ФАО сводка предложения зерновых и спроса на зерновые. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. URL: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/ru/>
10. Iskenderov, R., Lebedev, A., Zacharin, A., Lebedev, P. (2018). Evaluating effectiveness of grinding process grain materials. Engineering for Rural Development. Proceedings, 102–108. doi: <https://doi.org/10.22616/erdev2018.17.n147>
11. Savinyh, P., Shirobokov, V., Fedorov, O., Ivanovs, S. (2018). Influence of rotary grain crusher parameters on quality of finished product. Engineering for Rural Development. Proceedings, 131–136. doi: <https://doi.org/10.22616/erdev2018.17.n158>
12. Измельчение зерна и компонентов комбикормов. Агровестник. URL: <https://agrovesti.net/lib/tech/fodder-production-tech/izmelchenie-zerna-i-komponentov-kombikormov.html>
13. Мишуров, Н. П. (2012). Технологии и оборудование для производства комбикормов в хозяйствах. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 204.
14. Агрегат кормодробильный АКР-1. Реммаш. URL: <http://www.glazovmash.ru/product/drobilka-akr-1>
15. Дробилка КД-2А. Слободской машиностроительный завод. URL: https://smsz.ru/products/g_kombikorm/kd2a/
16. Молотковая дробилка RVO. NEUERO Farm - und Fördertechnik GmbH. URL: <http://www.neuero-farm.com/proizvodstvo-kombikormov/drobilki>
17. Глебов, Л. А., Демский, А. Б., Веденьев, В. Ф., Яблоков, А. Е. (2010). Технологическое оборудование и поточные линии предприятий по переработке зерна. М.: ДеЛи принт, 696.
18. Дробилка КУ-203. Слободской машиностроительный завод. URL: https://smsz.ru/products/g_kombikorm/ku203/
19. Дробилка зерна ДПМ-18,5. АгроПоставка. URL: <https://ar-pn.com/drobilka-zerna-dpm-18-5/>
20. Мельница для зерна (дробилка) всасывающая Н-119/3 18,5 кВт. DOZAMECH. URL: <https://dozameh.com/products/drobilki/zernodrobilka-vsasyvayushchaya-h-1193.html>
21. Лапшин, В. Б., Абалихин, А. М., Кувшинов, В. В., Терентьев, В. В., Богданов, В. С. (2010). Пат. № 107488 RU. Измельчитель фуражного зерна. заявл. 31.08.2010; опубл. 20.08.2011.
22. Лапшин, В. Б., Абалихин, А. М., Колобов, М. Ю., Боброва, Н. В., Субботин, К. В. (2008). Пат. № 74581 RU. Измельчитель фуражного зерна. заявл. 04.02.2008; опубл. 10.07.2008.

23. Абалихин, А. М., Крупин, А. В., Жукова, Т. А., Долгова, Е. А. (2018). Пат. № 189365 RU. Центробежный измельчитель фуражного зерна. заявл. 14.05.2018; опубл. 21.05.2019.
24. Wondra, K. J. (1993). Effects of particle size, mill type, and diet form on performance of finishing pigs and lactating sows. Manhattan.
25. Иванов, Ю. А., Сыроватка, В. И., Сергеев, Н. С., Запевалов, М. В. (2009). Центробежно-роторное измельчение фуражного зерна и рапса. Техника и оборудование для села, 2, 20–21.
26. Макарецев, Н. Г. (1999). Кормление сельскохозяйственных животных. Калуга: ГУП «Облиздат», 646.
27. Булатов, С. Ю., Нечаев, В. Н., Шамин, А. Е. (2020). Результаты оценки качества измельчения зерновых дробилкой ДЗМ-6. Вестник НГИЭИ, 3 (106), 21–36. doi: <http://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10022>
28. Абалихин, А. М., Волхонов, М. С., Крупин, А. В., Колесникова, А. И. (2020). Теоретическое исследование влияния геометрических параметров и расположения ударных элементов ротора ударно-центробежного измельчителя на скорости и углы вылета измельчаемых частиц. Аграрный вестник Верхневолжья, 2 (31), 62–70.
29. Шагдыров, И. Б., Балданов, М. Б., Петина, Н. Р., Шагдыров, Б. И. (2015). Анализ конструктивно-режимных и технологических параметров многоступенчатой дробилки фуражного зерна по степени измельчения. Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 3 (40).