

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7623

УДК 636.085.622; 631.363.21

Статья

Испытания центробежного измельчителя фуражного зерна

Абалихин Антон Михайлович

кандидат технических наук, доцент, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), anton-abalikhin@yandex.ru

Барабанов Дмитрий Владимирович

научный сотрудник, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), barabanov_dmitry@mail.ru

Крупин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), kрупinav37@mail.ru

Муханов Николай Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет (Российская Федерация), niket81@rambler.ru

Получена: 12 января 2023 / Принята: 8 мая 2024 / Опубликовано: 11 мая 2024

Аннотация: Измельчение фуражного зерна — одна из основных операций, необходимых для приготовления кормов. От качества зернового размола зависят правильная работа пищеварительной системы животных, их здоровье и продуктивность. Для измельчения фуражного зерна на большинстве предприятий агропромышленного комплекса применяют молотковые дробилки, опыт эксплуатации которых выявил недостаточную эффективность протекающего в них процесса измельчения. С целью повышения эффективности процесса измельчения фуражного зерна предложено использовать центробежный измельчитель, в котором реализована другая кинетика движения и протекает несколько иной процесс взаимодействия измельчаемого материала с активными и пассивными рабочими органами по сравнению с молотковыми дробилками. Представлено подробное описание и рассмотрен принцип работы центробежного измельчителя фуражного зерна. Для исследования работы центробежного измельчителя в производственных условиях была создана поточно-технологическая линия по переработке фуражного зерна. Представлена

схема и дано описание работы поточно-технологической линии по переработке фуражного зерна в производственных условиях, которая включает следующие основные элементы: шнек загрузочный; центробежный измельчитель; шнек выгрузной; смеситель; устройства контроля и регулирования. Изложена методика проведения экспериментальных исследований в производственных условиях с описанием последовательности и средств контроля выбранных режимных параметров; представлены формулы по определению исследуемых параметров, таких как производительность, потребляемая мощность, средний диаметр измельчённых частиц. Дано обоснование и представлен выбор основных режимных параметров и критериев, исследуемых при проведении экспериментов. Для выбора оптимального режима функционирования центробежного измельчителя фуражного зерна при измельчении зерна ячменя в производственных условиях представлен анализ данных, полученных в ходе лабораторных исследований. Установлено, что при частоте вращения ротора, равной 3500 мин^{-1} , и площади выгрузного окна оперативного бункера $0,001458 \text{ м}^2$ наблюдается наибольшая производительность центробежного измельчителя, а в совокупности с величиной потребляемой мощности и полученными размерами измельчённых частиц достигнута наилучшая эффективность процесса измельчения. По результатам проведённых исследований в лабораторных и производственных условиях представлен сравнительный анализ полученных данных и сделан вывод о возможности эксплуатации центробежного измельчителя на выбранном оптимальном режиме и при частоте вращения ротора, находящейся за пределами величины, необходимой для разрушения зерна. Произведён анализ полученных данных с указанием причин расхождения результатов, полученных при проведении экспериментов в лабораторных и производственных условиях.

Ключевые слова: фуражное зерно; центробежный измельчитель; зерновой размол; пылевидная фракция

DOI: UDK 636.085.622; 631.363.21

Article

Testing of a feed grain centrifugal shredder

Anton Abalikhin

D. Sc. in engineering, associate professor, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), anton-abalikhin@yandex.ru

Dmitry Barabanov

researcher, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), barabanov_dmitry@mail.ru

Aleksander Krupin

D. Sc. in engineering, associate professor, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), krupinav37@mail.ru

Nikolay Mukhanov

D. Sc. in engineering, associate professor, Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology (Russian Federation), nikem81@rambler.ru

Received: 12 January 2023 / Accepted: 8 May 2024 / Published: 11 May 2024

Abstract: Grinding of feed grain is one of the main operations necessary for the preparation of feed. The proper functioning of the digestive system of animals, their health and productivity depend on the quality of grain grinding. To grind feed grain, most enterprises of the agro-industrial complex use hammer crushers; however, the operating experience has revealed lack of efficacy of their grinding process. In order to increase the efficiency of the feed grain grinding process, the authors propose to use a centrifugal shredder based on a different kinetics with a slightly different process of interaction between the crushed material and active and passive crushing members in comparison with those of hammer crushers. A detailed description is presented and the principle of operation of a centrifugal feed grain shredder is considered. To study the operation of the centrifugal shredder in working environment a production line for feed grain processing was created. The authors present a diagram and a description of the production line operation for feed grain processing in working environment, which includes the following main elements: a feed auger; a centrifugal shredder; an outfeed auger; a mixer; control and regulation devices. The authors describe the experiment conducted in working environment including the sequence and means of control of the selected operating parameters and present formulas to determine the studied parameters,

such as: productivity, power consumption, average diameter of crushed particles. The rationale for the choice of the main regime parameters and criteria studied during the experiments is presented. To select the optimal mode of operation of a centrifugal feed grain shredder when grinding barley grain in working environment, an analysis of data obtained during laboratory studies is presented. It was found that with a rotor rotation speed equal to 3500 min⁻¹ and an area of the discharge window of the operational hopper of 0,001458 m², the greatest productivity of the centrifugal shredder is observed, and in combination with the amount of power intake and the resulting sizes of crushed particles, the best efficiency of the grinding process is achieved. Based on the results of the research conducted in laboratory and working environment, a comparative analysis of the data obtained is presented. The authors conclude that operating a centrifugal shredder at the selected optimal mode and at a rotor speed that is beyond the value necessary for grain destruction is possible. The obtained data analysis indicated the reasons for the discrepancy of the results obtained during experiments in laboratory and working environment.

Keywords: feed grain; centrifugal shredder; grain grinding; pulverized fraction

1. Введение

Фуражное зерно — неотъемлемый компонент рационов кормления всех сельскохозяйственных животных и птицы. Оно входит в состав комбикормов или рассыпных многокомпонентных полнорационных кормовых смесей. Измельчение фуражного зерна — обязательная операция при приготовлении комбикормов и кормосмесей. При измельчении разрушается твёрдая оболочка зерна, многократно увеличивается площадь внешней поверхности частиц корма, облегчается разжёвывание корма животными, улучшаются условия его переваривания и повышается усваиваемость питательных веществ.

Важным показателем качества измельчения является размер частиц полученного размола. Он должен быть не минимально возможным, а оптимальным для каждого вида и половозрастной группы животных — в соответствии с зоотехническими требованиями. Так, для поросят-сосунов оптимальный размер частиц размола составляет 0,5—0,8 мм, для поросят-отъёмшей — 0,9—1,1 мм, для других групп свиней — 1—1,4 мм, а для коров, нетелей, крупного рогатого скота (КРС) на откорме, а также взрослых овец и коз — 1,5—2 мм. Скармливание переизмельчённых кормов с большим содержанием пылевидной фракции опасно не только снижением усваиваемости питательных веществ корма, но и может явиться причиной развития различных заболеваний желудочно-кишечного тракта и даже гибели животных [1], [2]. Скармливание животным зерна крупного помола приводит к снижению переваримости и усваиваемости питательных веществ и, как следствие, к уменьшению продуктивности и увеличению удельных затрат на производство корма.

В процессе производства рассыпных и гранулированных комбикормов качество измельчения компонентов оказывает влияние на эффективность проведения последующих операций, таких как смешивание и гранулирование. Средний размер частиц размола влияет на продолжительность смешивания, коэффициент вариации состава смеси, крошимость гранул [3], [4].

Наибольшее распространение в настоящее время из существующих технических средств для измельчения фуражного зерна имеют молотковые дробилки различных конструкций и производительности. Все они, наряду с удобством эксплуатации, имеют общие недостатки, основными из которых являются высокая энергоёмкость измельчения и значительное содержание в зерновом размоле пылевидной фракции (10—20 % и более) при тонком помоле.

Альтернативой молотковым дробилкам являются центробежные измельчители, принцип действия которых отличается от молотковых дробилок тем, что измельчение зерна происходит не за счёт активных рабочих органов вращающегося ротора, а на периферийной поверхности — деке. Ротор представляет собой диск с лопатками или рёбрами и осуществляет функцию разгона зёрен до скорости, которая обеспечит их разрушение при ударе о поверхность деки. Анализ разрабатываемых рядом исследователей

центробежных измельчителей ударного действия [5—8] показывает, что они обладают некоторыми преимуществами в сравнении с молотковыми дробилками:

- более низкий удельный расход энергии;
- высокая энергонапряжённость в рабочей зоне за счёт минимального зазора между активными и пассивными рабочими органами, что обеспечивает высокую степень измельчения при сравнительно низкой металлоёмкости машины;
- получение продукта измельчения, форма частиц которого может быть вписана в куб, с меньшим содержанием пылевидной фракции;
- простое и эффективное воздействие на смещение границ гранулометрического состава продуктов измельчения путём изменения скорости вращения ротора за счёт использования решет с отверстиями и отбойников деки различных форм и размеров;
- наиболее простая конструкция ротора обуславливает более низкую стоимость его изготовления и меньшую трудоёмкость технического обслуживания машины.

В настоящее время центробежные измельчители для фуражного зерна не производятся серийно, но разрабатываются различными научными коллективами.

Цель исследования — провести сравнительную оценку показателей эффективности работы и качества получаемого зернового размола центробежного измельчителя фуражного зерна при испытаниях его в лабораторных и производственных условиях.

2. Материалы и методы

Разработанный авторами центробежный измельчитель [9], [10] содержит (фото 1) станину 1 с виброопорами, корпус рабочей камеры 2 со съёмной передней крышкой, к ней крепится горловина оперативного бункера 3, в верхней части которой установлена регулировочная заслонка, привод 4 (включает электродвигатель, клиноременную передачу и приводной вал в корпусе подшипников).

Передаточное число клиноременной передачи составило 0,767 — необходимо для достижения частоты вращения ротора, обеспечивающей скорость вылета измельчаемых частиц, достаточную для их разрушения.

В корпусе рабочей камеры 2 располагаются рабочие органы измельчителя, которые включают: ротор 5 с лопатками, деку 6 с отбойниками и решето 7. Дека и решето крепятся к кронштейнам 8.

Перед началом проведения экспериментов была произведена балансировка ротора измельчителя на рабочей частоте его вращения с помощью виброметра-балансировщика БАЛКОМ 1. В ходе предварительно проведённых лабораторных исследований работы центробежного измельчителя были определены рациональные режимы функционирования [11—13] в исследуемом диапазоне варьирования факторов. Возникла необходимость проверки полученных результатов. Для этого в СПК «Рассвет» Гаврилово-Посадского района Ивановской области были проведены испытания измельчителя в производственных условиях.

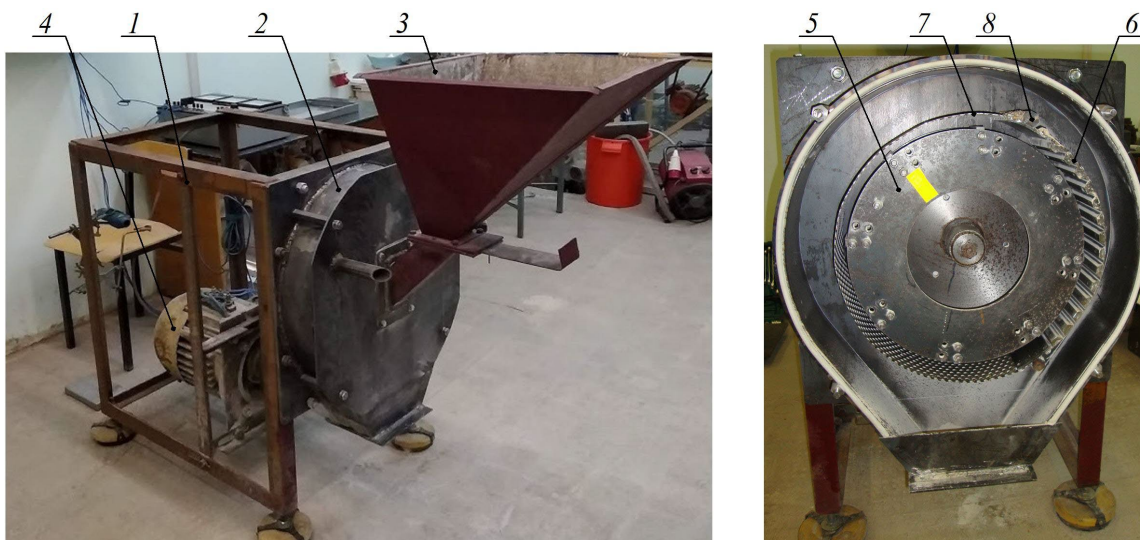


Фото 1. Устройство центробежного измельчителя: 1 — станина; 2 — корпус рабочей камеры; 3 — оперативный бункер; 4 — привод; 5 — ротор; 6 — дека; 7 — решето; 8 — кронштейн (фото авторов)

Photo 1. The device of the centrifugal shredder: 1 — the bed; 2 — the body of the working chamber; 3 — operational hopper; 4 — drive; 5 — rotor; 6 — deck; 7 — sieve; 8 — bracket

Для проведения испытаний измельчителя была собрана поточно-технологическая линия (фото 2) в следующем составе: загрузочный шнек 1, центробежный измельчитель 2, выгрузной шнек 3, смеситель ССК-0,6 4 с электронно-весовым устройством ЭВДУ-082 5, тензодатчики которого располагались под опорными плитами стоек смесителя. Для управления частотой вращения ротора электродвигателя измельчителя был использован регулятор частоты электрического тока Innovert ITD 113043В, расположенный в шкафу управления 6. В шкафу управления электродвигателем загрузочного шнека 7 располагался регулятор частоты электрического тока Powtran E3-9100-007Н. Запуск и остановку электродвигателей смесителя и выгрузного шнека производили с помощью электромагнитных пускателей, установленных в шкафу управления ПУ-2ф 8.

Электронно-весовое устройство 5 смесителя 4 было подключено к тензодатчикам и шкафу управления 8.

Для проведения испытаний измельчитель комплектовался решетом с диаметром отверстий 6 мм. Это обусловлено тем, что при использовании этого решета при проведении лабораторных испытаний измельчителя была достигнута наибольшая эффективность процесса измельчения зерна. В качестве материала для проведения испытаний использовалось фуражное зерно ячменя сорта «Сонет» влажностью 11,5 %.

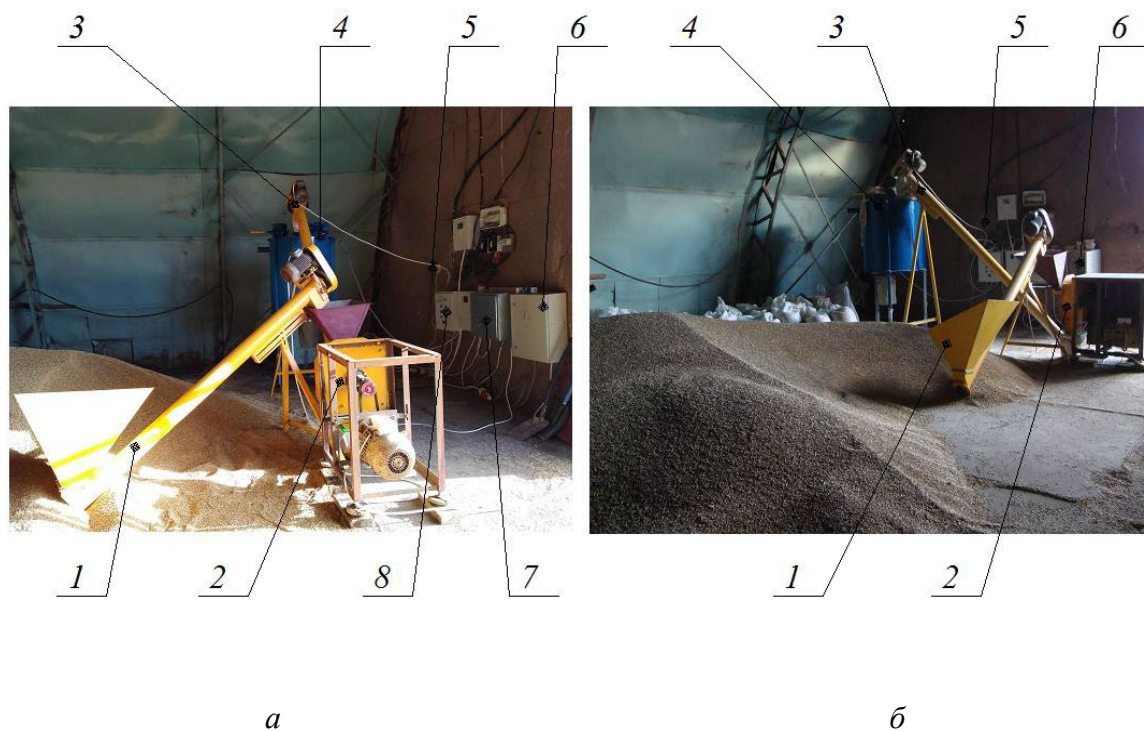


Фото 2. Поточно-технологическая линия для проведения испытаний центробежного измельчителя: *а* — главный вид; *б* — вид сбоку; 1 — шнек загрузочный; 2 — измельчитель центробежный; 3 — шнек выгрузной; 4 — смеситель ССК-0,6; 5 — электронно-весовое устройство ЭВДУ-082; 6 — шкаф управления электродвигателем измельчителя; 7 — шкаф управления электродвигателем загрузочного шнека; 8 — шкаф управления электродвигателями смесителя и электродвигателем выгрузного шнека ПУ-2ф (фото авторов)

Photo 2. Flow-processing line for testing a centrifugal shredder: (a) main view; (b) side view; 1 — feed auger; 2 — centrifugal shredder; 3 — outfeed auger; 4 — mixer SSK-0,6; 5 — electronic weighing device EVDU-082; 6 — control cabinet of the electric motor of the shredder; 7 — control cabinet of the electric motor of the feed auger; 8 — control cabinet of the electric motors of the mixer and the electric motor of the outfeed auger PU-2f

Производственные испытания проводились при полностью открытой регулировочной заслонке, при этом площадь выпускного окна оперативного бункера 3 (фото 1) максимальная и составила $F = 0,001458 \text{ м}^2$. Во время проведения производственных испытаний осуществлялась обратная последовательность включения в работу электродвигателей элементов поточно-технологической линии. При помощи пусковых кнопок шкафа управления 8 включались в работу электродвигатель смесителя 4, затем электродвигатель выгрузного шнека 3. Далее при помощи регулятора частоты электрического тока, установленного в шкафу управления 6, запускали электродвигатель центробежного

измельчителя, и устанавливали требуемую частоту вращения ротора 5 (фото 1) n , мин^{-1} . Исследования проводились при частоте вращения ротора измельчителя, равной: $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$. В последнюю очередь запускали электродвигатель загрузочного шнека 1 регулятором частоты электрического тока, расположенным в шкафу 7, с помощью которого добивались необходимой подачи зернового материала. Во время проведения опытов фуражное зерно загружалось в приёмный бункер загрузочного шнека 1 (на фото 2 позицией не обозначен) вручную, откуда перемещалось в оперативный бункер 3 измельчителя (фото 1), далее самотёком поступало в корпус рабочей камеры 2 (фото 1), где измельчалось; выгрузным шнеком 3 измельчённое зерно подавалось в смеситель 4, рабочая ёмкость которого использовалась в качестве весового бункера; при помощи электронно-весового устройства 5 определялась масса порции измельчённого зерна. При измельчении каждой порции зерна секундомером контролировалось время измельчения, фиксировался потребляемый электродвигателем центробежного измельчителя ток, показания которого выводились на дисплее передней панели регулятора частоты электрического тока, установленного в шкафу 6.

Мощность, потребляемая измельчителем, определялась по следующей формуле:

$$N = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где I — сила тока по показаниям амперметра регулятора частоты электрического тока при стабильном режиме работы измельчителя, А; U — напряжение трёхфазной сети электрического тока, В; $U = 380 \text{ В}$; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности электродвигателя, $\cos \varphi = 0,82$ — по технической характеристике электродвигателя ДМ132SA2, установленного на центробежном измельчителе.

Производительность измельчителя определялась по формуле

$$Q = 3600 \cdot m / t, \quad (2)$$

где Q — производительность измельчителя, кг/ч ; m — масса измельчаемой порции материала, кг ; t — время измельчения порции, с .

Из полученного зернового размола отбирались пробы из трёх разных порций, полученных при исследуемых частотах вращения ротора, затем проводился ситовой анализ. По результатам ситового анализа определялся средний размер частиц зернового размола по формуле

$$d_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^n d_i \cdot p_i / 100 = (d_1 \cdot p_1 + d_2 \cdot p_2 + \dots + d_n \cdot p_n) / 100, \quad (3)$$

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

При общей массе навески измельчённого материала, равной 100 г, суммарный весовой выход составляет: $\sum p_i = 100 \%$. Все значения полученных результатов были определены как среднее для трёх выполненных измерений.

3. Результаты

В результате проведённых предварительных исследований было установлено, что наиболее качественный размол зерна ячменя (с точки зрения качества получаемой зерновой дерти) получается при использовании решета с диаметром отверстий 6 мм [11]. Для оценки эффективности работы центробежного измельчителя и выбора наиболее оптимального режима его работы для проведения производственных испытаний были проведены лабораторные исследования, результаты которых представлены ниже.

Лабораторные исследования проводились при частотах вращения ротора $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$. Такой диапазон частот вращения был выбран ввиду того, что частота вращения пропорциональна скорости вылета измельчаемой частицы (скорости ударного нагружения) v (м/с) с лопатки ротора измельчителя, которая напрямую влияет на эффективность процесса измельчения. Многими исследователями установлено, что разрушение зернового материала в измельчителях ударного действия происходит при скорости ударного нагружения, которая лежит в диапазоне: $v = 60\text{—}100 \text{ м/с}$. Указанным значениям частоты вращения ротора, при известных его геометрических параметрах, соответствуют следующие величины скорости вылета измельчаемых зёрен с поверхности лопаток ротора: при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ — $v = 72,4 \text{ м/с}$; при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ — $v = 86,9 \text{ м/с}$; при $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ — $v = 101,3 \text{ м/с}$. Отсюда следует, что при выбранных частотах вращения ротора будет происходить процесс измельчения зернового материала.

При проведении поисковых экспериментов в лабораторных условиях установлены следующие значения площади выпускного окна F (м^2) оперативного бункера: $F = 0,000702 \text{ м}^2$ — нижняя граница; $F = 0,00108 \text{ м}^2$; $F = 0,001458 \text{ м}^2$ — верхняя граница. При уменьшении площади выпускного окна до значений, меньших нижней границы, наблюдалось закономерное снижение производительности, что приводило к повышению энергоёмкости процесса измельчения. При увеличении площади выпускного окна оперативного бункера до значений, превышающих верхнюю границу, происходило уменьшение частоты вращения ротора с последующей аварийной остановкой — работа измельчителя невозможна. Результаты проведённых лабораторных экспериментов представлены на рисунках 1 и 2 в виде поверхностей отклика. На рисунке 1 показана зависимость производительности Q (кг/ч) измельчителя от частоты вращения ротора n (мин^{-1}) и площади выпускного окна F (м^2). На рисунке 2 показана зависимость потребляемой мощности N (Вт) электродвигателя измельчителя от частоты вращения ротора n (мин^{-1}) и площади выпускного окна F (м^2). Номинальная паспортная мощность электродвигателя ДМ132SA2 составляла: $N = 5500 \text{ Вт}$.

Для более полного понимания влияния исследуемых факторов на качество получаемой зерновой дерти в таблице 1 представлены значения среднего диаметра измельчённых частиц $d_{\text{ср}}$ (мм) в зависимости от частоты вращения ротора n (мин^{-1}) и площади выпускного окна оперативного бункера F (м^2).

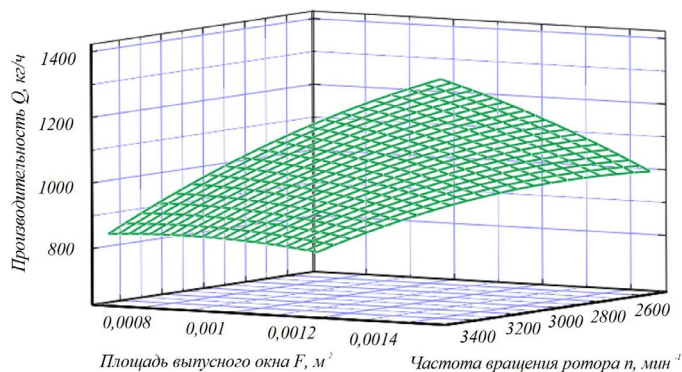


Рисунок 1. Зависимость производительности измельчителя от площади выпускного окна бункера и частоты вращения ротора (рисунок авторов)

Figure 1. The dependence of the productivity of the shredder on the area of the outlet window of the hopper and the speed of rotation of the rotor

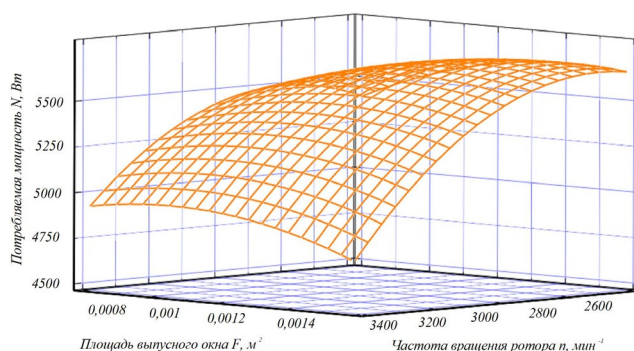


Рисунок 2. Зависимость потребляемой мощности от площади выпускного окна бункера и частоты вращения ротора (рисунок авторов)

Figure 2. The dependence of power intake on the area of the hopper outlet window and the speed of rotation of the rotor

Таблица 1. Значения среднего диаметра измельчённых частиц зерна в миллиметрах от исследуемых параметров работы центробежного измельчителя

Table 1. The values of the average diameter of the crushed grain particles in mm from the investigated parameters of the centrifugal shredder

Частота вращения ротора n , мин^{-1}	Площадь выпускного окна оперативного бункера F , м^2		
	0,001458	0,00108	0,000702
2500	2,532	2,37	2,278
3000	2,276	2,174	1,985
3500	1,958	1,95	1,795

Совместный анализ поверхностей (рисунки 3 и 4) и таблицы 1 показал следующее. Максимальная производительность составила: $Q = 1422$ кг/ч при частоте вращения ротора $n = 3500$ мин⁻¹ и площади выпускного окна оперативного бункера $F = 0,001458$ м² — *лучший результат*; при этом потребляемая мощность составила: $N = 5721$ Вт, что на 3,8 % превосходит номинальную мощность электродвигателя, — создаётся перегрузка. Средний диаметр измельчённых частиц составил: $d_{cp} = 1,958$ мм, что вполне укладывается в границы зоотехнических требований. Рассмотрим изменения значений производительности Q (кг/ч), мощности N (Вт) и среднего диаметра измельчённых частиц d_{cp} (мм) при уменьшении значений частоты вращения ротора n (мин⁻¹) и фиксированном значении площади выпускного окна оперативного бункера: $F = 0,001458$ м². При снижении частоты вращения ротора до $n = 3000$ мин⁻¹ производительность снизилась на 8 % и составила: $Q = 1299$ кг/ч. Потребляемая мощность снизилась на 1,5 % и составила: $N = 5691$ Вт, что также превосходит номинальную мощность электродвигателя на 3,4 %. Средний диаметр измельчённых частиц составил: $d_{cp} = 2,276$ мм, что на 12 % превышает значение верхней границы зоотехнических требований. При дальнейшем снижении частоты вращения ротора до $n = 2500$ мин⁻¹ по сравнению с лучшим результатом производительность снизилась на 27 % и составила: $Q = 1043$ кг/ч; значение потребляемой мощности снизилось на 2,4 % и составило: $N = 5655$ Вт — возникает перегрузка электродвигателя на 2,8 %. Средний диаметр измельчённых частиц $d_{cp} = 2,532$ мм по сравнению с лучшим результатом увеличился на 22,7 % и на 21,1 % превышает значение верхней границы зоотехнических требований. Далее представим результаты экспериментов для значения площади выпускного окна оперативного бункера: $F = 0,00108$ м² в сравнении с результатами, полученными для рассматриваемых значений частот вращения ротора n (мин⁻¹) и площади: $F = 0,001458$ м². При частоте вращения ротора $n = 3500$ мин⁻¹ производительность составила: $Q = 1317$ кг/ч, что меньше на 7,4 % по сравнению с аналогичным случаем с большей площадью выпускного окна оперативного бункера. Потребляемая мощность составила: $N = 5623$ Вт — снизилась по отношению к сравниваемому варианту на 1,8 %; перегрузка электродвигателя составила 2,8 %, в предыдущем варианте перегрузка была на 1 % больше. Средний диаметр измельчённых частиц $d_{cp} = 1,95$ мм; уменьшение по отношению к сравниваемому варианту составило 0,4 %, что незначительно. При частоте вращения ротора $n = 3000$ мин⁻¹ производительность $Q = 1039$ кг/ч; снижение значительное и составило 20 %. Потребляемая мощность снизилась на 1,5 % и составила: $N = 5606$ Вт; перегрузка электродвигателя составляет 1,9 %, что на 1,5 % меньше, чем в сравниваемом варианте. Средний диаметр измельчённых частиц уменьшился на 4,5 % и составил: $d_{cp} = 2,174$ мм. При частоте вращения ротора $n = 2500$ мин⁻¹ производительность измельчителя уменьшится на 21,3 % и составит: $Q = 821$ кг/ч. Значение потребляемой мощности составило: $N = 5586$ Вт — это на 1,3 % меньше, чем в сравниваемом варианте; перегрузка электродвигателя составила 1,6 %, что на 1,2 % меньше, чем в сравниваемом варианте. Величина среднего диаметра измельчённых частиц составила: $d_{cp} = 2,37$ мм — это на 6,4 % меньше, чем в сравниваемом

варианте, и на 25,7 % превосходит значение верхней границы зоотехнических требований. Дальнейшее исследование поверхностей (рисунки 3 и 4) показало, что при уменьшении площади выпускного окна оперативного бункера до $F = 0,000702 \text{ м}^2$ при известных значениях частоты вращения ротора n (мин^{-1}) производительность измельчителя изменялась в пределах: от $Q = 797 \text{ кг/ч}$ до $Q = 643 \text{ кг/ч}$ — это наименьшие значения. Потребляемая мощность изменялась в пределах от $N = 4936 \text{ Вт}$ до $N = 4432 \text{ Вт}$ — электродвигатель недогружен. Средний диаметр частиц измельчённого зерна варьировался в пределах от $d_{\text{ср}} = 1,795 \text{ мм}$ до $d_{\text{ср}} = 2,278 \text{ мм}$, что в большей степени соответствует зоотехническим требованиям. При данном положении регулировочной заслонки ($F = 0,000702 \text{ м}^2$) средняя производительность Q (кг/ч) снижается более чем в два раза, что приведёт к значительному повышению энергоёмкости процесса измельчения и увеличению периода функционирования центробежного измельчителя при переработке требуемого количества фуражного зерна. При двух других положениях регулировочной заслонки ($F = 0,001458 \text{ м}^2$ и $F = 0,00108 \text{ м}^2$) и заданных значениях частоты вращения ротора ($n = 3500 \text{ мин}^{-1}$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$) наблюдаются значительный разброс по производительности Q (кг/ч) и близкие по величине значения потребляемой мощности N (Вт) — электродвигатель всегда немного перегружен. При частотах вращения ротора $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ величина среднего диаметра измельчённых частиц $d_{\text{ср}}$ (мм) выходит за пределы верхней границы зоотехнических требований, что недопустимо. При частоте вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ и при положениях регулировочной заслонки, обуславливающих площадь выпускного окна оперативного бункера ($F = 0,001458 \text{ м}^2$ и $F = 0,00108 \text{ м}^2$), средний диаметр измельчённых частиц зерна $d_{\text{ср}}$ (мм) практически одинаков, а значения входят в пределы границ зоотехнических требований. Но при $F = 0,001458 \text{ м}^2$ наблюдается максимальная производительность: $Q = 1422 \text{ кг/ч}$, следовательно, на данном режиме работы измельчителя, который ранее был определён как лучший результат, будет наблюдаться наименьшая энергоёмкость процесса измельчения, при этом можно считать, что процесс измельчения будет протекать наиболее эффективно, а режим работы — оптимальный.

Как было установлено ранее, при оптимальном режиме работы центробежного измельчителя создаётся перегрузка электродвигателя, равная 3,8 %. Возникает необходимость проверки работы измельчителя и качества получаемой зерновой дерти при указанной перегрузке электродвигателя с сохранением достигнутой производительности в производственных условиях при измельчении непрерывного потока зернового материала.

Анализ поверхностей (рисунки 3 и 4) наглядно указал на следующую закономерность: показатели эффективности работы измельчителя стабильно увеличивались с возрастанием частоты вращения ротора в исследуемом диапазоне. Справедливо было бы предположить, что при увеличении частоты вращения ротора до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ возможен дальнейший рост показателей эффективности работы измельчителя. Поэтому часть зернового материала в ходе производственных испытаний была измельчена при частоте вращения ротора измельчителя $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$.

Для оценки эффективности работы центробежного измельчителя в лабораторных и производственных условиях в таблице 2 представлены значения производительности и потребляемой мощности. В таблице 3 отражены данные гранулометрического состава неизмельчённого зерна и зернового размол, полученные в ходе проведённого ситового анализа.

Таблица 2. Значения показателей эффективности работы центробежного измельчителя

Table 2. Values of performance indicators of the centrifugal shredder

Вид испытаний	Частота вращения ротора n , мин^{-1}	Производительность Q , кг/ч	Потребляемая мощность N , Вт
В лабораторных условиях	3500	1422	5721
В производственных условиях	3500	1343	6294
	4000	1392	6356

Таблица 3. Гранулометрический состав неизмельчённого зерна и зернового размол

Table 3. Granulometric composition of non-ground grain and grain grinding

Вид испытаний	Частота вращения ротора n , мин^{-1}	Остаток на лабораторных ситах, %							Средний диаметр частиц $d_{\text{ср}}$, мм
		Диаметр отверстий лабораторных сит, мм							
		5	3	2	1	0,5	0,25	0	
Неизмельчённое зерно									
Лабораторные	—	0,73	96,23	2,57	0,37	0,01	0	0	3,96
Производственные	—	0,34	99,03	0,55	0,08	0	0	0	4,01
Зерновой размол									
Лабораторные	3500	0,11	11,98	32,56	37,03	30,87	6,17	1,87	1,958
Производственные	3500	0	6,42	28,1	44,43	7,35	9,02	4,68	1,721
Производственные	4000	0	3,96	20,85	46,28	8,51	12,26	8,14	1,504

Анализ данных таблиц 2 и 3 показал следующее. При частоте вращения ротора измельчителя $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ в производственных условиях величина производительности Q (кг/ч) снизилась на 5,6 % (существенно) по сравнению с лабораторными условиями. При увеличении частоты вращения до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ производительность Q (кг/ч) повысилась по сравнению с предыдущим вариантом на 3,6 %, а по сравнению с оптимальным режимом работы в лабораторных условиях снижение составило 2,2 %. При частоте вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ в производственных условиях произошло увеличение потребляемой мощности N (Вт) на 9,1 %; перегрузка электродвигателя составила 12,7 %. При увеличении частоты вращения ротора до значения $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ по сравнению с предыдущим вариантом произошло увеличение потребляемой мощности N (Вт) на 1 %, а по сравнению с вариантом исследования в лабораторных условиях увеличение составило 10 %; перегрузка электродвигателя составила 13,5 %. Средний диаметр измельчённых частиц (таблица 3) d_{cp} (мм) в производственных условиях получился меньше на 12,1 %. При частоте вращения ротора $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ значение d_{cp} (мм) уменьшилось на 12,6 % (это закономерно) и на 23,2 % уменьшилось по сравнению с лабораторным экспериментом при частоте $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$. При сравнении данных ситового анализа результатов, полученных в лабораторных и производственных исследованиях, установлено следующее. Содержание неизмельчённых частиц на сите с отверстиями диаметром 5 мм: в производственных условиях 0 %; по зоотехническим требованиям допускается до 5 % — требование выполняется. Содержание неизмельчённых частиц на сите с отверстиями диаметром 3 мм: при частоте вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ уменьшение составило в 1,87 раза; при частоте $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ уменьшение по сравнению с предыдущим вариантом составило в 1,62 раза; уменьшение по сравнению с вариантом исследования в лабораторных условиях в 3,03 раза закономерно. По зоотехническим требованиям остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм не должен превышать 25 % — требование в рассмотренных вариантах выполняется. Содержание пылевидной фракции по результатам производственных испытаний по сравнению с лабораторными при $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ возросло в 2,5 раза; при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ увеличилось в 4,35 раза, а по сравнению с предыдущим вариантом в производственных условиях увеличение частоты вращения ротора на 500 мин^{-1} приводит к возрастанию содержания пыли в 1,74 раза.

4. Обсуждение и заключение

В соответствии с требованиями межгосударственных стандартов (ГОСТ 9268-2015, ГОСТ 34109-2017, ГОСТ 10199-2017, ГОСТ 18221-2018) производится контроль качества измельчения зерна. Анализируя данные таблицы 3 и опираясь при этом на нормативы данных стандартов и вышеприведённые зоотехнические требования, можно сделать вывод, что полученный размол в рассматриваемых случаях соответствует требованиям для следующих видов и половозрастных групп животных: молочные коровы, нетели,

быки-производители, КРС на откорме, молодняк КРС до 18 месяцев, взрослые овцы и молодняк овец старше 4 месяцев, взрослые козы и молодняк коз старше 3 месяцев.

Совместный анализ данных таблиц 2 и 3 указал на различие результатов, полученных в лабораторных и производственных условиях при установленном оптимальном режиме работы центробежного измельчителя: частота вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$, площадь выпускного окна оперативного бункера $F = 0,001458 \text{ м}^2$. По результатам проведённых производственных исследований установлено, что производительность измельчителя Q (кг/ч) снизилась на 5,6 %; одновременно с этим произошло повышение потребляемой мощности N (Вт) на 9,1 %. При возрастании частоты вращения ротора до значения $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ наблюдалось увеличение производительности Q (кг/ч) на 3,6 %, что закономерно, и потребляемой мощности N (Вт) на 1 %, причём значение мощности лежит выше допустимого предела при эксплуатации электродвигателя. Также наблюдалось значительное возрастание содержания пылевидной фракции в 1,74 раза. Увеличение частоты вращения ротора измельчителя до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ привело к повышению энергоёмкости процесса измельчения и увеличению содержания пылевидной фракции в продукте помола.

Подводя общий итог, необходимо отметить следующие причины расхождения показателей эффективности работы центробежного измельчителя при проведении экспериментов в производственных и лабораторных условиях. Перед проведением экспериментов в лабораторных и производственных условиях были осуществлены замеры влажности зерна, которые показали, что в хозяйстве показатель влажности зерна выше на 0,5 %, чем зерна, находящегося в лаборатории. Результат ситового анализа неизмельчённого зерна показал, что средний диаметр зерна в хозяйстве больше на 1,3 %. Перечисленные отличия говорят о том, что для измельчения зерна до необходимых размеров в производственных условиях необходимо потратить больше энергии, а если дополнительного подвода энергии не будет, то производительность измельчителя снизится. В нашем случае мы наблюдаем одновременные изменения этих показателей. При этом потребляемая мощность в производственных условиях увеличивалась с одновременным снижением производительности. На это повлияло различие в способах отвода измельчённого зерна от центробежного измельчителя, которые были реализованы в лабораторных и производственных условиях. При проведении исследований в лабораторных условиях выгрузка измельчённого зерна осуществлялась в прикрепленный к выгрузной горловине корпуса рабочей камеры фильтр-мешок, который во время работы измельчителя создавал незначительное сопротивление выходу воздуха. Во время проведения производственных испытаний измельчённое зерно через небольшую тканевую проставку из выгрузной горловины попадало в выгрузной шнек длиной 2,5 м, который перемещал материал в смеситель. В верхней части смесителя крепился фильтр-мешок, служащий для отвода воздуха, поступающего вместе с измельчённым зерном. Витки винта выгрузного шнека служили препятствием свободному выходу воздуха, создавая тем самым подпор воздуха в рабочей камере центробежного измельчителя. Из-за этого возрастала кратность

циркуляции измельчаемых частиц зерна в корпусе рабочей камеры (увеличилось время пребывания измельчаемых частиц в корпусе рабочей камеры измельчителя), что привело к снижению производительности Q (кг/ч) и значительному возрастанию содержания пылевидной фракции в зерновой дерти. Увеличение потребляемой мощности N (Вт) произошло ввиду возрастания числа взаимодействий измельчаемых частиц с активными и пассивными рабочими органами. Всё вышперечисленное привело к снижению эффективности процесса измельчения фуражного зерна в центробежном измельчителе при проведении производственных испытаний по сравнению с испытаниями в лабораторных условиях. Для повышения эффективности процесса измельчения при использовании центробежного измельчителя в составе поточно-технологической линии необходимо обеспечить отвод воздуха, предусмотрев на выходе из корпуса рабочей камеры разгрузительное устройство с фильтром, или использовать для отвода измельчённого зерна пневмоконвейер всасывающего типа.

Сравнительная оценка показателей эффективности работы и качества полученного зернового размола указала на некоторое различие результатов, полученных в ходе проведения экспериментов центробежного измельчителя в производственных и лабораторных условиях на установленном оптимальном режиме работы. При анализе полученных данных были определены причины их расхождения. Повышение частоты вращения ротора с $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ привело к росту производительности Q (кг/ч) и потребляемой мощности N (Вт), а следовательно, увеличению энергоёмкости процесса измельчения. Вместе с тем произошло снижение качества зернового размола из-за значительного повышения содержания пылевидной фракции. Перечисленное привело к снижению эффективности процесса измельчения при частоте вращения ротора $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$.

Исследование выполнено в рамках научно-технической программы 122041300126-6 «Разработка перспективных технических средств, обеспечивающих интенсификацию и ресурсосбережение послеуборочной доработки и переработки фуражного зерна» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023—2025 гг.

Список литературы

1. Providing for quality grinding grain for the implementation of the biological potential of productive animals / A. T. Lebedev, R. V. Pavlyuk, A. V. Zaharin [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7, no. 2. P. 1525—1528. EDN NNJCL.
2. Investigations in feeding device of grain crusher / P. Savinyh, V. Kazakov, A. Moshonkin [et al.] // Engineering for Rural Development, Jelgava, 22—24 May 2019 years. Jelgava, 2019. Vol. 18. P. 123—128. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N165. EDN TMYVNW.
3. Рюле М. Как изменяется размер частиц при гранулировании // Комбикорма. 2020. № 6. С. 34—36. EDN CCZYPO.

4. Diet mixing time affects nursery pig performance / C. N. Groesbeck, R. D. Goodband, M. D. Tokach [et al.] // *Journal of Animal Science*. 2007, July. Vol. 85, issue 7. P. 1793—1798. DOI: 10.2527/jas.2007-0019.
5. Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method / A. Marczuk, A. Blicharz-Kania, P. A. Savinykh [et al.] // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, no. 19. P. 5362. DOI: 10.3390/su11195362. EDN ITXUKG.
6. Исследование показателей работы роторно-центробежного измельчителя / А. Ю. Исупов, И. И. Иванов, Ю. А. Плотникова [и др.] // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. № 3 (108). С. 90—99. DOI: 10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99. EDN TYAVLX.
7. Обзор измельчителей центробежно-роторного принципа действия / М. К. Сердалин, А. С. Бардола, Т. А. Кине [и др.] // *Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: Материалы V междунар. научно-практич. конф., Омск, 29 апр. 2021 года*. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2021. С. 112—117. EDN SJUTWE.
8. *Сухопаров А. И., Иванов И. И., Плотникова Ю. А.* Влияние конструктивных параметров центробежно-роторного измельчителя на качественные показатели его работы // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2021. № 3 (64). С. 106—114. DOI: 10.24411/2078-1318-2021-3-106-114. EDN MLNHAЕ.
9. Патент на полезную модель № 189365. Российская Федерация. Центробежный измельчитель фуражного зерна / А. М. Абалихин, А. В. Крупин, Т. А. Жукова, Е. А. Долгова; опубл. 21.05.2019. Бюл. № 15. EDN FYQСТН.
10. Патент на изобретение № 2752143. Российская Федерация. Центробежный измельчитель сыпучих сельскохозяйственных материалов / М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, А. В. Крупин; опубл. 23.07.2021. Бюл. № 21. EDN JСNIX.
11. *Волхонов М. С., Абалихин А. М., Крупин А. В.* Анализ эффективности работы нового измельчителя фуражного зерна // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020. № 60. С. 124—131. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-13124. EDN SJAXUG.
12. Studying The Operational Efficiency of The Centrifugal Impact Feed Grain Crusher of The New Design / M. Volkhonov, A. Abalikhin, A. Krupin [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5, no. 1 (107). P. 44—51. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.212994. EDN WAKJCE.
13. Определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного зерна / М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, Д. В. Барабанов [и др.] // *Аграрная наука*. 2023. № 6. С. 111—115. DOI: 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115. EDN YBKWVP.

References

1. Lebedev A. T., Pavlyuk R. V., Zaharin A. V., Lebedev P. A. Providing for quality grinding grain for the implementation of the biological potential of productive animals. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 1525—1528. EDN NNJCL.
2. Savinyh P., Kazakov V., Moshonkin A., Ivanov S. Investigations in feeding device of grain crusher. *Engineering for Rural Development, Jelgava, 22—24 May 2019 years*. Jelgava, 2019, vol. 18, pp. 123—128. doi: 10.22616/ERDev2019.18.N165. EDN TMYVNW.
3. Ryule M. How the particle size changes during granulation. *Compound feed*, 2020, no. 6, pp. 34—36. EDN CCZYPO. (In Russ.)

4. Groesbeck C. N., Goodband R. D., Tokach M. D., Dritz S. S., Nelssen J. L., De Rouchey J. M. Diet mixing time affects nursery pig performance. *Journal of Animal Science*, 2007, July, vol. 85, issue 7, pp. 1793—1798. doi: 10.2527/jas.2007-0019.
5. Marczuk A., Blicharz-Kania A., P. A. Savinykh [et al.] Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design Method. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 19, pp. 5362. doi: 10.3390/su11195362. EDN ITXUKG.
6. Isupov A. Yu., Ivanov I. I., Plotnikova Yu. A., Sukhoparov A. I. Investigation of the performance indicators of a rotary-centrifugal shredder. *Agroecoengineering*, 2021, no. 3 (108), pp. 90—99. doi: 10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99. EDN TYAVLX. (In Russ.)
7. Serdalin M. K., Bardola A. S., Kine T. A., Sabiev U. K. Review of shredders of centrifugal — rotary principle of action. *Scientific and technical support of agroindustrial complex, state and prospects of development : materials of the V International scientific and practical conference, Omsk, April 29, 2021*. Omsk, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, 2021, pp. 112—117. EDN SJUTWE. (In Russ.)
8. Sukhoparov A. I., Ivanov I. I., Plotnikova Yu. A. Influence of design parameters of a centrifugal-rotary shredder on the quality indicators of its operation. *Proceedings of the Saint Petersburg State Agrarian University*, 2021, no. 3 (64), pp. 106—114. doi: 10.24411/2078-1318-2021-3-106-114. EDN MLNHAЕ. (In Russ.)
9. Abalikhin A. M., Krupin A. V., Zhukova T. A., Dolgova E. A. Utility Model Patent No. 189365. Russian Federation. Centrifugal shredder of feed grain. Publ. 21.05.2019. Bul. No. 15. EDN FYQCTH. (In Russ.)
10. Volkhonov M. S., Abalikhin A. M., Krupin A. V. Patent for invention No. 2752143. Russian Federation. Centrifugal shredder of bulk agricultural materials. Publ. 23.07.2021. Bul. No. 21. EDN JICNIX. (In Russ.)
11. Volkhonov M. S., Abalikhin A. M., Krupin A. V. Analysis of the efficiency of the new feed grain shredder. *Izvestiya of the Saint Petersburg State Agrarian University*, 2020, no. 60, pp. 124—131. doi: 10.24411/2078-1318-2020-13124. EDN SJAXUG. (In Russ.)
12. Volkhonov M., Abalikhin A., Krupin A., Maksimov I. Studying The Operational Efficiency of The Centrifugal Impact Feed Grain Crusher of The New Design. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 5, no. 1 (107), pp. 44—51. doi: 10.15587/1729-4061.2020.212994. EDN WAKJCE.
13. Volkhonov M. S., Abalikhin A. M., Barabanov D. V., Krupin A. V., Mukhanov N. V. [et al.]. Determination of optimal modes of operation of centrifugal fodder grain grinder. *Agrarian Science*, 2023, no. 6, pp. 111—115. doi: 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115. EDN YBKWVP. (In Russ.)