

5 DOI:

6 УДК 636.085.622; 631.363.21

7 *Статья*

8 **Испытания центробежного измельчителя фуражного зерна**

9 *Получена: / Принята: / Опубликовано:*
10

11 **Аннотация:** Измельчение фуражного зерна – одна из основных операций,
12 необходимая для приготовления кормов. От качества зернового размола зависит
13 правильная работа пищеварительной системы животных, их здоровье и
14 продуктивность. Для измельчения фуражного зерна на большинстве предприятий
15 агропромышленного комплекса применяют молотковые дробилки, опыт
16 эксплуатации которых выявил недостаточную эффективность протекающего в них
17 процесса измельчения. С целью повышения эффективности процесса измельчения
18 фуражного зерна, предложено использовать центробежный измельчитель, в
19 котором реализована другая кинетика движения и протекает несколько иной
20 процесс взаимодействия измельчаемого материала с активными и пассивными
21 рабочими органами, по сравнению с молотковыми дробилками. Представлено
22 подробное описание и рассмотрен принцип работы центробежного измельчителя
23 фуражного зерна. Для исследования работы центробежного измельчителя в
24 производственных условиях была создана поточно-технологическая линия по
25 переработке фуражного зерна. Представлена схема, и дано описание работы
26 поточно-технологической линии по переработке фуражного зерна в
27 производственных условиях, которая включает следующие основные элементы:
28 шнек загрузочный; центробежный измельчитель; шнек выгрузной; смеситель;
29 устройства контроля и регулирования. Изложена методика проведения
30 экспериментальных исследований в производственных условиях с описанием
31 последовательности и средств контроля выбранных режимных параметров;
32 представлены формулы по определению исследуемых параметров, таких как:
33 производительность, потребляемая мощность, средний диаметр измельченных
34 частиц. Дано обоснование и представлен выбор основных режимных параметров и
35 критериев, исследуемых при проведении экспериментов. Для выбора оптимального
36 режима функционирования центробежного измельчителя фуражного зерна при
37 измельчении зерна ячменя в производственных условиях, представлен анализ
38 данных, полученных в ходе лабораторных исследований. Установлено, что при
39 частоте вращения ротора равной 3500 мин^{-1} и площади выгрузного окна
40 оперативного бункера $0,001458 \text{ м}^2$ наблюдается наибольшая производительность
41 центробежного измельчителя, а в совокупности с величиной потребляемой

42 мощности и полученными размерами измельченных частиц, достигнута наилучшая
43 эффективность процесса измельчения. По результатам проведенных исследований
44 в лабораторных и производственных условиях представлен сравнительный анализ
45 полученных данных, и сделан вывод о возможности эксплуатации центробежного
46 измельчителя на выбранном оптимальном режиме, и при частоте вращения ротора,
47 находящейся за пределами величины, необходимой для разрушения зерна.
48 Произведен анализ полученных данных с указанием причин расхождения
49 результатов, полученных при проведении экспериментов в лабораторных и
50 производственных условиях.

51 **Ключевые слова:** фуражное зерно, центробежный измельчитель, зерновой размол,
52 пылевидная фракция

54

55 DOI: UDK 636.085.622; 631.363.21

56 *Article*

57 **Tests of a centrifugal feed grain shredder**

58 *Received: / Accepted: / Published:*

59

60 **Abstract:** Grinding of feed grain is one of the main operations necessary for the
61 preparation of feed. The proper functioning of the digestive system of animals, their
62 health and productivity depends on the quality of grain grinding. To grind feed grain,
63 most enterprises of the agro-industrial complex use hammer crushers, operating
64 experience of which has revealed the insufficient efficiency of the grinding process
65 occurring in them. In order to increase the efficiency of the process of grinding feed
66 grain, it is proposed to use a centrifugal shredder, which implements a different kinetics
67 of movement and proceeds a slightly different process of interaction of the crushed
68 material with active and passive working bodies, compared with hammer crushers. A
69 detailed description is presented and the principle of operation of a centrifugal feed grain
70 shredder is considered. To study the operation of the centrifugal shredder in production
71 conditions, a production line for processing feed grain was created. A diagram is
72 presented and a description of the operation of a production line for processing feed grain
73 in production conditions is given, which includes the following main elements: a loading
74 auger; a centrifugal shredder; an unloading auger; a mixer; control and regulation devices.
75 The method of conducting experimental studies in production conditions with a
76 description of the sequence and means of control of the selected operating parameters is
77 described; formulas for determining the parameters under study are presented, such as:
78 productivity, power consumption, average diameter of crushed particles. The rationale is
79 given and the choice of the main regime parameters and criteria studied during the
80 experiments is presented. To select the optimal mode of operation of a centrifugal feed
81 grain shredder when grinding barley grain in production conditions, an analysis of data
82 obtained during laboratory studies is presented. It was found that with a rotor rotation
83 speed equal to 3500 min^{-1} and an area of the discharge window of the operational hopper
84 of $0,001458 \text{ m}^2$, the greatest productivity of the centrifugal shredder is observed, and in
85 combination with the amount of power consumed and the resulting sizes of crushed
86 particles, the best efficiency of the grinding process is achieved. Based on the results of
87 the research conducted in laboratory and production conditions, a comparative analysis of
88 the data obtained is presented, and a conclusion is made about the possibility of operating
89 a centrifugal shredder at the selected optimal mode, and at a rotor speed that is beyond the
90 value necessary for grain destruction. The analysis of the obtained data was carried out,

91 indicating the reasons for the discrepancy of the results obtained during experiments in
92 laboratory and production conditions.

93 **Keywords:** feed grain, grain grinding, centrifugal shredder, grain grinding, pulverized
94 fraction

95

96

97 1. Введение

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

105 Важным показателем качества измельчения является размер частиц полученного размола.
106 Он должен быть не минимально возможным, а оптимальным для каждого вида и
107 половозрастной группы животных – в соответствии с зоотехническими требованиями. Так для
108 поросят-сосунов оптимальный размер частиц размола составляет 0,5...0,8 мм, для поросят-
109 отъемышей – 0,9...1,1 мм, для других групп свиней – 1...1,4 мм, а для коров, нетелей, КРС на
110 откорме, а также для взрослых овец и коз – 1,5...2 мм. Скармливание переизмельченных
111 кормов, с большим содержанием пылевидной фракции, опасно не только снижением
112 усвояемости питательных веществ корма, но и может явиться причиной развития различных
113 заболеваний желудочно-кишечного тракта и даже гибели животных [1, 2]. Скармливание
114 животным зерна крупного помола приводит к снижению переваримости и усвояемости
115 питательных веществ и, как следствие, к снижению продуктивности, и к увеличению
116 удельных затрат на производство корма.

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

122 Наибольшее распространение из существующих технических средств для измельчения
123 фуражного зерна имеют молотковые дробилки различных конструкций и производительности.
124 Все они, наряду с удобством эксплуатации, имеют общие недостатки, основными из которых
125 являются высокая энергоёмкость измельчения и высокое содержание в зерновом размоле
126 пылевидной фракции – 10...20 % и более – при тонком помоле.

127 Альтернативой молотковым дробилкам являются центробежные измельчители, принцип
128 действия которых отличается от молотковых дробилок тем, что измельчение зерна происходит
129 не за счет активных рабочих органов вращающегося ротора, а на периферийной поверхности –
130 деке. Ротор же представляет собой диск с лопатками или ребрами и осуществляет функцию
131 разгона зерен до скорости, которая обеспечит разрушение зерен при ударе о поверхность деки.
132 Анализ разрабатываемых рядом исследователей центробежных измельчителей ударного
133 действия [5-8] показывает, что они обладают рядом преимуществ в сравнении с молотковыми
134 дробилками:

135 – более низкий удельный расход энергии;

136 – высокую энергонапряженность в рабочей зоне, за счет минимального зазора между
137 активными и пассивными рабочими органами, что обеспечивает высокую степень
138 измельчения при сравнительно низкой металлоемкости машины;

139 – получение продукта измельчения, форма частиц которого может быть вписана в куб, и с
140 меньшим содержанием пылевидной фракции;

141 – простое и эффективное воздействие на смещение границ гранулометрического состава
142 продуктов измельчения путем изменения скорости вращения ротора, за счет использования
143 решет с отверстиями и отбойников деки различных форм и размеров;

144 – более простая конструкция ротора обуславливает меньшую стоимость его изготовления и
145 меньшую трудоемкость технического обслуживания машины.

146 Центробежные измельчители для фуражного зерна на данный момент не производятся
147 серийно, но разрабатываются различными научными коллективами.

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

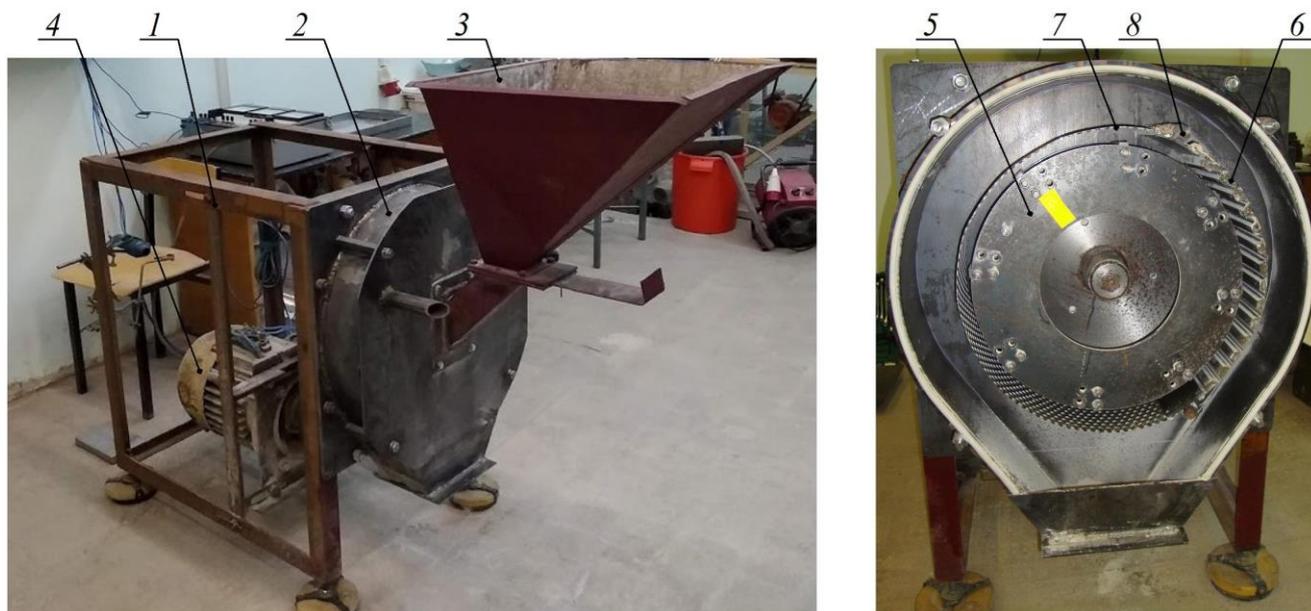
151 2. Материалы и методы

152 Разработанный авторами центробежный измельчитель [9, 10] содержит (рисунок 1) станину
153 1 с виброопорами, корпус рабочей камеры 2 со съемной передней крышкой, к которой
154 крепится горловина оперативного бункера 3, в верхней части которой установлена
155 регулировочная заслонка, привод 4 (включает в себя электродвигатель, клиноременную
156 передачу и приводной вал в корпусе подшипников).

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

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

163 В ходе предварительно проведенных лабораторных исследований работы центробежного
164 измельчителя были определены оптимальные режимы функционирования [11-13] в
165 исследуемом диапазоне варьирования факторов. Возникла необходимость проверки
166 полученных результатов. Для этого в СПК «Рассвет» Гаврилово-Посадского района
167 Ивановской области были проведены испытания измельчителя в производственных условиях.

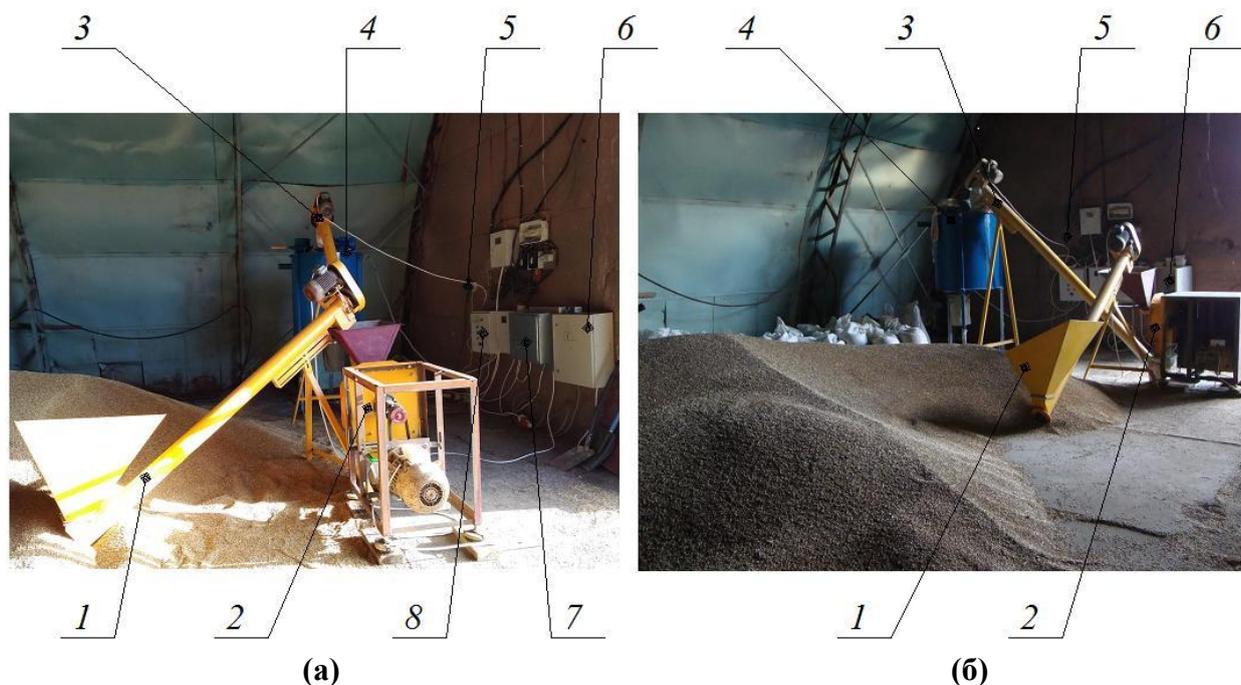


168

169 **Рисунок 1.** Устройство центробежного измельчителя: 1-станина; 2-корпус рабочей
170 камеры; 3-оперативный бункер; 4-привод; 5-ротор; 6-дека; 7-решето; 8-кронштейн

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

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



183
184

185 **Рисунок 2.** Поточно-технологическая линия для проведения испытаний
186 центробежного измельчителя: (а) главный вид; (б) вид сбоку; 1-шнек загрузочный; 2-
187 измельчитель центробежный; 3-шнек выгрузной; 4-смеситель ССК-0,6; 5-электронно-
188 весовое устройство ЭВДУ-082; 6-шкаф управления электродвигателем измельчителя;
189 7-шкаф управления электродвигателем загрузочного шнека; 8-шкаф управления
190 электродвигателями смесителя и электродвигателем выгрузного шнека ПУ-2ф.

191 **Figure 2.** Flow-processing line for testing a centrifugal shredder: (a) main view; (b) side
192 view; 1-loading auger; 2-centrifugal shredder; 3-unloading auger; 4-mixer SSK-0,6; 5-
193 electronic weighing device EVDU-082; 6-control cabinet of the electric motor of the
194 shredder; 7-control cabinet of the electric motor of the loading auger; 8-control cabinet of
195 the electric motors of the mixer and the electric motor of the unloading auger PU-2f.

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

198 Для проведения испытаний измельчитель комплектовался решетом с диаметром отверстий
199 6 мм. Это обусловлено тем, что при использовании этого решета при проведении
200 лабораторных испытаний измельчителя была достигнута наибольшая эффективность процесса
201 измельчения зерна. В качестве материала для проведения испытаний использовалось
202 фуражное зерно ячменя сорта «Сонет» влажностью 11,5 %. Производственные испытания
203 проводились при полностью открытой регулировочной заслонке, при этом площадь
204 выпускного окна оперативного бункера 3 (рисунок 1) максимальная и составила $F = 0,001458$
205 m^2 . Во время проведения производственных испытаний осуществлялась обратная
206 последовательность включения в работу электродвигателей элементов поточно-

207 технологической линии. При помощи пусковых кнопок шкафа управления 8 включались в
208 работу электродвигатель смесителя 4, затем электродвигатель выгрузного шнека 3. Далее при
209 помощи регулятора частоты электрического тока, установленного в шкафу управления 6,
210 запускали электродвигатель центробежного измельчителя, и устанавливали требуемую
211 частоту вращения ротора 5 (рисунок 1) n , мин^{-1} . Исследования проводились при частоте
212 вращения ротора измельчителя, равной $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$. В последнюю очередь
213 запускали электродвигатель загрузочного шнека 1 регулятором частоты электрического тока,
214 расположенным в шкафу 7, с помощью которого добивались необходимой подачи зернового
215 материала. Во время проведения опытов фуражное зерно загружалось в приемный бункер
216 загрузочного шнека 1 (на рисунке 2 позицией не обозначен) вручную, откуда перемещалось в
217 оперативный бункер 3 измельчителя (рисунок 1), далее самотеком поступало в корпус рабочей
218 камеры 2 (рисунок 1), где измельчалось; выгрузным шнеком 3 измельченное зерно подавалось
219 в смеситель 4, рабочая емкость которого использовалась в качестве весового бункера; при
220 помощи электронно-весового устройства 5 определялась масса порции измельченного зерна.
221 При измельчении каждой порции зерна секундомером контролировалось время измельчения,
222 и потребляемый электродвигателем центробежного измельчителя ток, показания которого
223 выводились на дисплее передней панели регулятора частоты электрического тока,
224 установленного в шкафу 6.

225 Мощность, потребляемая измельчителем, определялась по следующей формуле:

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

226 где I – сила тока по показаниям амперметра регулятора частоты электрического тока при
227 стабильном режиме работы измельчителя, А;

228 U – напряжение трехфазной сети электрического тока, В; $U = 380 \text{ В}$;

229 $\cos \varphi$ – коэффициент мощности электродвигателя, $\cos \varphi = 0,82$ – по технической характеристике
230 электродвигателя ДМ132SA2, установленного на центробежном измельчителе.

231 Производительность измельчителя определялась по формуле:

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

232 где Q – производительность измельчителя, кг/ч;

233 m – масса измельчаемой порции материала, кг;

234 t – время измельчения порции, с.

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

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

239 где d_i – средний размер отверстий двух смежных сит, мм;

240 p_i – весовой выход (масса класса), %.

241 При общей массе навески измельченного материала, равной 100 г, суммарный весовой
242 выход составляет $\sum p_i = 100$ %.

243 Все значения полученных результатов были определены как среднее для трех выполненных
244 измерений.

245 3. Результаты

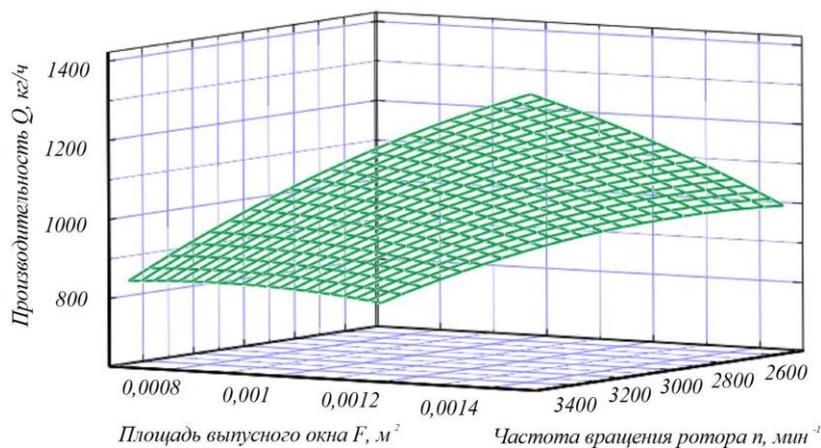
246 В результате проведенных предварительных исследований было установлено, что наиболее
247 качественный размол зерна ячменя (с точки зрения качества получаемой зерновой дерти)
248 получается при использовании решета с диаметром отверстий 6 мм [11]. Для оценки
249 эффективности работы центробежного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

252 Лабораторные исследования проводились при частотах вращения ротора $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$, $n =$
253 3000 мин^{-1} , $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$. Такой диапазон частот вращения был выбран ввиду того, что
254 частота вращения пропорциональна скорости вылета измельчаемой частицы (скорости
255 ударного нагружения) v (м/с) с лопатки ротора измельчителя, которая напрямую влияет на
256 эффективность процесса измельчения. Многими исследователями установлено, что
257 разрушение зернового материала в измельчителях ударного действия происходит при
258 скорости ударного нагружения, которая лежит в диапазоне $v = 60 \dots 100$ м/с. Указанным
259 значениям частоты вращения ротора, при известных его геометрических параметрах,
260 соответствуют следующие величины скорости вылета измельчаемых зерен с поверхности
261 лопаток ротора: при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ – $v = 72,4$ м/с; при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ – $v = 86,9$ м/с; при $n =$
262 3500 мин^{-1} – $v = 101,3$ м/с. Отсюда следует, что при выбранных частотах вращения ротора
263 будет происходить процесс измельчения зернового материала.

264 При проведении поисковых экспериментов в лабораторных условиях установлены
265 следующие значения площади выпускного окна F (м^2) оперативного бункера: $F = 0,000702 \text{ м}^2$
266 – нижняя граница; $F = 0,00108 \text{ м}^2$; $F = 0,001458 \text{ м}^2$ – верхняя граница. При уменьшении
267 площади выпускного окна до значений, меньших нижней границы, наблюдалось закономерное
268 снижение производительности, что приводило к повышению энергоемкости процесса
269 измельчения. При увеличении площади выпускного окна оперативного бункера до значений,
270 превышающих верхнюю границу, происходило уменьшение частоты вращения ротора с
271 последующей аварийной остановкой – работа измельчителя не возможна.

272 Результаты проведенных лабораторных экспериментов представлены на рисунках 3 и 4 в
273 виде поверхностей отклика. На рисунке 3 показана зависимость производительности Q (кг/ч)

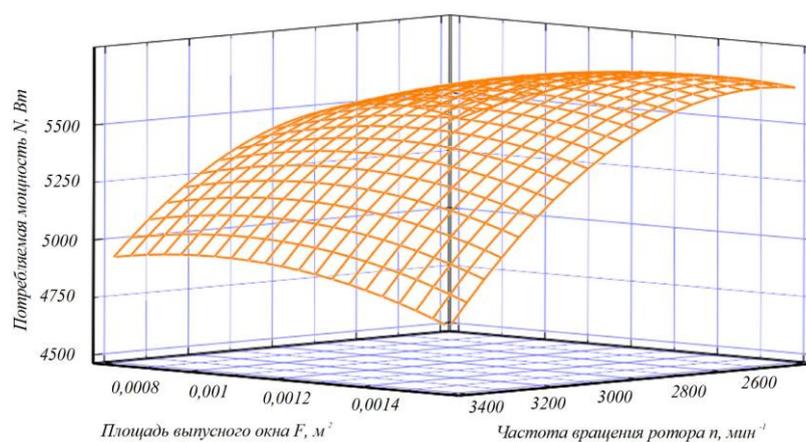
274 измельчителя от частоты вращения ротора n (мин^{-1}) и площади выпускного окна F (м^2). На
275 рисунке 4 показана зависимость потребляемой мощности N (Вт) электродвигателя
276 измельчителя от частоты вращения ротора n (мин^{-1}) и площади выпускного окна F (м^2).



277

278 **Рисунок 3.** Зависимость производительности измельчителя от площади выпускного
279 окна бункера и частоты вращения ротора

280 **Figure 3.** The dependence of the productivity of the shredder on the area of the outlet
281 window of the hopper and the speed of rotation of the rotor



282

283 **Рисунок 4.** Зависимость потребляемой мощности от площади выпускного окна
284 бункера и частоты вращения ротора

285 **Figure 4.** The dependence of power consumption on the area of the hopper outlet window
286 and the speed of rotation of the rotor

287 Номинальная паспортная мощность электродвигателя ДМ132SA2 составляла $N = 5500$ Вт.
288 Для более полного понимания влияния исследуемых факторов на качество получаемой
289 зерновой дерты в таблице 1 представлены значения среднего диаметра измельченных частиц

290 d_{cp} (мм) в зависимости от частоты вращения ротора n (мин^{-1}) и площади выпускного окна
291 оперативного бункера F (м^2).

292 **Таблица 1.** Значения среднего диаметра измельченных частиц зерна в мм от
293 исследуемых параметров работы центробежного измельчителя

294 **Table 1.** The values of the average diameter of the crushed grain particles in mm from the
295 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

296 Совместный анализ поверхностей (рисунки 3 и 4) и таблицы 1 показал следующее.
297 Максимальная производительность составила $Q = 1422$ кг/ч при частоте вращения ротора $n =$
298 3500 мин^{-1} и площади выпускного окна оперативного бункера $F = 0,001458$ м^2 – *лучший*
299 *результат*; при этом потребляемая мощность составила $N = 5721$ Вт, что на 3,8% превосходит
300 номинальную мощность электродвигателя – создается перегрузка. Средний диаметр
301 измельченных частиц составил $d_{cp} = 1,958$ мм, что вполне укладывается в границы
302 зоотехнических требований. Рассмотрим изменения значений производительности Q (кг/ч),
303 мощности N (Вт) и среднего диаметра измельченных частиц d_{cp} (мм) при уменьшении
304 значений частоты вращения ротора n (мин^{-1}) и фиксированном значении площади выпускного
305 окна оперативного бункера $F = 0,001458$ м^2 . При снижении частоты вращения ротора до $n =$
306 3000 мин^{-1} производительность снизилась на 8% и составила $Q = 1299$ кг/ч. Потребляемая
307 мощность снизилась на 1,5% и составила $N = 5691$ Вт, что также превосходит номинальную
308 мощность электродвигателя на 3,4%. Средний диаметр измельченных частиц составил $d_{cp} =$
309 $2,276$ мм, что на 12% превышает значение верхней границы зоотехнических требований. При
310 дальнейшем снижении частоты вращения ротора до $n = 2500$ мин^{-1} , по сравнению с лучшим
311 результатом, производительность снизилась на 27% и составила $Q = 1043$ кг/ч; значение
312 потребляемой мощности снизилось на 2,4% и составило $N = 5655$ Вт – возникает перегрузка
313 электродвигателя на 2,8%. Средний диаметр измельченных частиц $d_{cp} = 2,532$ мм, по
314 сравнению с лучшим результатом, увеличился на 22,7%, и на 21,1% превышает значение
315 верхней границы зоотехнических требований. Далее представим результаты экспериментов
316 для значения площади выпускного окна оперативного бункера $F = 0,00108$ м^2 в сравнении с
317 результатами, полученными для рассматриваемых значений частот вращения ротора n (мин^{-1})
318 и площади $F = 0,001458$ м^2 . При частоте вращения ротора $n = 3500$ мин^{-1} производительность
319 составила $Q = 1317$ кг/ч, что меньше на 7,4% по сравнению с аналогичным случаем с большей
320 площадью выпускного окна оперативного бункера. Потребляемая мощность составила $N =$

321 5623 Вт – снизилась по отношению к сравниваемому варианту на 1,8%; перегрузка
322 электродвигателя составила 2,8%, в предыдущем варианте перегрузка была на 1% больше.
323 Средний диаметр измельченных частиц $d_{cp} = 1,95$ мм; уменьшение по отношению к
324 сравниваемому варианту, составило 0,4%, что незначительно. При частоте вращения ротора n
325 $= 3000 \text{ мин}^{-1}$ производительность $Q = 1039$ кг/ч; снижение значительное и составило 20%.
326 Потребляемая мощность снизилась на 1,5% и составила $N = 5606$ Вт; перегрузка
327 электродвигателя составляет 1,9%, что на 1,5% меньше, чем в сравниваемом варианте.
328 Средний диаметр измельченных частиц уменьшился на 4,5% и составил $d_{cp} = 2,174$ мм. При
329 частоте вращения ротора $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ производительность измельчителя уменьшится на
330 21,3% и составит $Q = 821$ кг/ч. Значение потребляемой мощности составило $N = 5586$ Вт – это
331 на 1,3% меньше, чем в сравниваемом варианте; перегрузка электродвигателя составила 1,6%,
332 что на 1,2% меньше, чем в сравниваемом варианте. Величина среднего диаметра
333 измельченных частиц составила $d_{cp} = 2,37$ мм – это на 6,4% меньше, чем в сравниваемом
334 варианте и на 25,7% превосходит значение верхней границы зоотехнических требований.
335 Дальнейшее исследование поверхностей (рисунки 3 и 4), показало то что при уменьшении
336 площади выпускного окна оперативного бункера до $F = 0,000702 \text{ м}^2$ при известных значения
337 частоты вращения ротора n (мин^{-1}), производительность измельчителя изменялась в пределах
338 от $Q = 797$ кг/ч до $Q = 643$ кг/ч – это наименьшие значения. Потребляемая мощность
339 изменялась в пределах от $N = 4936$ Вт до $N = 4432$ Вт – электродвигатель недогружен.
340 Средний диаметр частиц измельченного зерна варьировался в пределах от $d_{cp} = 1,795$ мм до d_{cp}
341 $= 2,278$ мм, что в большей степени соответствует зоотехническим требованиям. При данном
342 положении регулировочной заслонки ($F = 0,000702 \text{ м}^2$) средняя производительность Q (кг/ч)
343 снижается более чем в два раза, что приведет к значительному повышению энергоемкости
344 процесса измельчения и увеличению периода функционирования центробежного
345 измельчителя при переработке требуемого количества фуражного зерна. При двух других
346 положениях регулировочной заслонки ($F = 0,001458 \text{ м}^2$ и $F = 0,00108 \text{ м}^2$) и заданных значениях
347 частоты вращения ротора ($n = 3500 \text{ мин}^{-1}$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$) наблюдается
348 значительный разброс по производительности Q (кг/ч) и близкие по величине значения
349 потребляемой мощности N (Вт) – электродвигатель всегда немного перегружен. При частотах
350 вращения ротора $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ величина среднего диаметра измельченных
351 частиц d_{cp} (мм) выходит за пределы верхней границы зоотехнических требований, что
352 недопустимо. При частоте вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ и при положениях регулировочной
353 заслонки, обуславливающих площадь выпускного окна оперативного бункера ($F = 0,001458 \text{ м}^2$
354 и $F = 0,00108 \text{ м}^2$), средний диаметр измельченных частиц зерна d_{cp} (мм) практически
355 одинаковый, а значения входят в пределы границ зоотехнических требований. Но при $F =$
356 $0,001458 \text{ м}^2$ наблюдается максимальная производительность $Q = 1422$ кг/ч, следовательно на
357 данном режиме работы измельчителя, который ранее был определен как лучший результат,
358 будет наблюдаться наименьшая энергоемкость процесса измельчения, при этом можно

359 считать, что процесс измельчения будет протекать наиболее эффективно, а режим работы –
360 оптимальный.

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

366 Анализ поверхностей (рисунки 3 и 4) наглядно указал на следующую закономерность:
367 показатели эффективности работы измельчителя стабильно увеличивались с увеличением
368 частоты вращения ротора в исследуемом диапазоне. Справедливо было бы предположить, что
369 при увеличении частоты вращения ротора до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ возможен дальнейший рост
370 показателей эффективности работы измельчителя. Поэтому часть зернового материала в ходе
371 производственных испытаний была измельчена при частоте вращения ротора измельчителя n
372 $= 4000 \text{ мин}^{-1}$.

373 Для оценки эффективности работы центробежного измельчителя в лабораторных и
374 производственных условиях, в таблице 2 представлены значения производительности и
375 потребляемой мощности. В таблице 3 представлены данные гранулометрического состава
376 неизмельченного зерна и зернового размола, полученные в ходе проведенного ситового
377 анализа.

378 **Таблица 2.** Значения показателей эффективности работы центробежного
379 измельчителя

380 **Table 2.** Values of performance indicators of the centrifugal shredder

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

381

382

383 **Таблица 3.** Гранулометрический состав неизмельченного зерна и зернового размола

384 **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_{cp} , мм
		Диаметр отверстий лабораторных сит, мм							
		5	3	2	1	0,5	0,25	0	
Неизмельченное 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

385 Анализ данных таблиц 2 и 3 показал следующее. При частоте вращения ротора
 386 измельчителя $n = 3500$ мин⁻¹ в производственных условиях величина производительности Q
 387 (кг/ч) снизилась на 5,6% (существенно), по сравнению с лабораторными условиями. При
 388 увеличении частоты вращения до $n = 4000$ мин⁻¹ производительность Q (кг/ч) повысилась по
 389 сравнению с предыдущим вариантом на 3,6%, а по сравнению с оптимальным режимом
 390 работы в лабораторных условиях – снижение составило 2,2%. При частоте вращения ротора n
 391 $= 3500$ мин⁻¹ в производственных условиях произошло увеличение потребляемой мощности N
 392 (Вт) на 9,1%; перегрузка электродвигателя составила 12,7%. При увеличении частоты
 393 вращения ротора до значения $n = 4000$ мин⁻¹, по сравнению с предыдущим вариантом,
 394 произошло увеличение потребляемой мощности N (Вт) на 1%, а по сравнению с вариантом
 395 исследования в лабораторных условиях увеличение составило 10%; перегрузка
 396 электродвигателя составила 13,5%. Средний диаметр измельченных частиц (таблица 3) d_{cp}
 397 (мм) в производственных условиях получился меньше на 12,1%. При частоте вращения ротора
 398 $n = 4000$ мин⁻¹ значение d_{cp} (мм) уменьшилось на 12,6% (это закономерно), и на 23,2%
 399 уменьшилось по сравнению с лабораторным экспериментом при частоте $n = 3500$ мин⁻¹. При
 400 сравнении данных ситового анализа результатов, полученных в лабораторных и
 401 производственных исследованиях установлено следующее. Содержание неизмельченных
 402 частиц на сите с отверстиями диаметром 5 мм: в производственных условиях 0%; по
 403 зоотехническим требованиям допускается до 5% – требование выполняется. Содержание
 404 неизмельченных частиц на сите с отверстиями диаметром 3 мм: при частоте вращения ротора

405 $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ уменьшение составило в 1,87 раза; при частоте $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ уменьшение, по
406 сравнению с предыдущим вариантом составило в 1,62 раза; уменьшение по сравнению с
407 вариантом исследования в лабораторных условиях в 3,03 раза – это закономерно. По
408 зоотехническим требованиям остаток на сите с отверстиями диаметром 3 мм не должен
409 превышать 25% – требование в рассмотренных вариантах выполняется. Содержание
410 пылевидной фракции по результатам производственных испытаний, по сравнению с
411 лабораторными, при $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$ увеличилось в 2,5 раза; при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ увеличилось в
412 4,35 раза, а по сравнению с предыдущим вариантом в производственных условиях увеличение
413 частоты вращения ротора на 500 мин^{-1} приводит к увеличению содержания пыли в 1,74 раза.

414 4. Обсуждение и заключение

415 Контроль качества измельчения зерна производится в соответствии с
416 межгосударственными стандартами (ГОСТ 9268-2015, ГОСТ 34109-2017, ГОСТ 10199-2017,
417 ГОСТ 18221-2018). Анализируя данные таблицы 3 и, опираясь при этом на требования данных
418 стандартов и вышеприведенные зоотехнические требования, можно сделать вывод, что
419 полученный размол, в рассматриваемых случаях, соответствует требованиям для следующих
420 видов и половозрастных групп животных: молочные коровы, нетели, быки-производители,
421 КРС на откорме, молодняк КРС до 18 месяцев, взрослые овцы и молодняк овец старше 4
422 месяцев, взрослые козы и молодняк коз старше 3 месяцев.

423 Совместный анализ данных таблиц 2 и 3 указал на различие результатов полученных в
424 лабораторных и производственных условиях при установленном оптимальном режиме работы
425 центробежного измельчителя: частота вращения ротора $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$, площадь выпускного
426 окна оперативного бункера $F = 0,001458 \text{ м}^2$. По результатам проведенных производственных
427 исследований установлено, что производительность измельчителя Q (кг/ч) снизилась на 5,6%,
428 одновременно с этим произошло увеличение потребляемой мощности N (Вт) на 9,1%. При
429 увеличении частоты вращения ротора до значения $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ наблюдалось увеличение
430 производительности Q (кг/ч) на 3,6%, что закономерно, и потребляемой мощности N (Вт) на
431 1%, причем значение мощности лежит выше допустимого предела при эксплуатации
432 электродвигателя. Также наблюдалось значительное увеличение содержания пылевидной
433 фракции в 1,74 раза. Увеличение частоты вращения ротора измельчителя до $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$
434 привело к повышению энергоемкости процесса измельчения и к увеличению содержания
435 пылевидной фракции в продукте помола.

436 Подводя общий итог, необходимо отметить следующие причины расхождения показателей
437 эффективности работы центробежного измельчителя при проведении экспериментов в
438 производственных и лабораторных условиях. Перед проведением экспериментов в
439 лабораторных и в производственных условиях были проведены замеры влажности зерна,
440 которые показали, что в хозяйстве показатель влажности зерна выше на 0,5%, чем зерна,
441 находящегося в лаборатории. Результат ситового анализа неизмельченного зерна показал, что
442 средний диаметр зерна в хозяйстве больше на 1,3%. Перечисленные отличия говорят о том,

443 что для измельчения зерна до необходимых размеров в производственных условиях
444 необходимо потратить больше энергии, а если дополнительного подвода энергии не будет, то
445 производительность измельчителя снизится. В нашем случае мы наблюдаем одновременные
446 изменения этих показателей. При этом потребляемая мощность в производственных условиях
447 увеличивалась с одновременным снижением производительности. На это повлияло различие в
448 способах отвода измельченного зерна от центробежного измельчителя, которые были
449 реализованы в лабораторных и производственных условиях. При проведении исследований в
450 лабораторных условиях выгрузка измельченного зерна осуществлялась в прикрепленный к
451 выгрузной горловине корпуса рабочей камеры фильтр-мешок, который во время работы
452 измельчителя создавал незначительное сопротивление выходу воздуха. Во время проведения
453 производственных испытаний измельченное зерно через небольшую тканевую проставку из
454 выгрузной горловины попадало в выгрузной шнек длиной 2,5 метра, который перемещал
455 материал в смеситель. В верхней части смесителя крепился фильтр-мешок, служащий для
456 отвода воздуха, поступавшего вместе с измельченным зерном. Витки винта выгрузного шнека
457 служили препятствием свободному выходу воздуха, создавая, тем самым, подпор воздуха в
458 рабочей камере центробежного измельчителя. Из-за этого увеличивалась кратность
459 циркуляции измельчаемых частиц зерна в корпусе рабочей камеры (увеличилось время
460 пребывания измельчаемых частиц в корпусе рабочей камеры измельчителя), что привело к
461 снижению производительности Q (кг/ч), и к значительному увеличению содержания
462 пылевидной фракции в зерновой дерти. Увеличение потребляемой мощности N (Вт)
463 произошло ввиду увеличения числа взаимодействий измельчаемых частиц с активными и
464 пассивными рабочими органами. Все перечисленное привело к снижению эффективности
465 процесса измельчения фуражного зерна в центробежном измельчителе при проведении
466 производственных испытаний по сравнению с испытаниями в лабораторных условиях. Для
467 повышения эффективности процесса измельчения при использовании центробежного
468 измельчителя в составе поточно-технологической линии необходимо обеспечить отвод
469 воздуха, предусмотрев на выходе из корпуса рабочей камеры разгрузительное устройство с
470 фильтром, или использовать для отвода измельченного зерна пневмоконвейер всасывающего
471 типа.

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

482 *Исследование выполнено в рамках научно-технической программы 122041300126-6*
483 *«Разработка перспективных технических средств обеспечивающих интенсификацию и*
484 *ресурсосбережение послеуборочной доработки и переработки фуражного зерна»*
485 *Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023-2025 годы.*

486 **Список литературы**

- 487 1. Providing for quality grinding grain for the implementation of the biological potential of
488 productive animals / A. T. Lebedev, R. V. Pavlyuk, A. V. Zaharin, P. A. Lebedev // Research
489 Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, No. 2. – P. 1525-
490 1528. – EDN NNJCL.
- 491 2. Investigations in feeding device of grain crusher / P. Savinyh, V. Kazakov, A. Moshonkin, S.
492 Ivanovs // Engineering for Rural Development, Jelgava, 22–24 мая 2019 года. Vol. 18. –
493 Jelgava: Без издательства, 2019. – P. 123-128. – DOI 10.22616/ERDev2019.18.N165. – EDN
494 TMYVNW.
- 495 3. Рюле М. Как изменяется размер частиц при гранулировании / М. Рюле // Комбикорма. –
496 2020. – № 6. – С. 34-36. – EDN CCZYPO.
- 497 4. Diet mixing time affects nursery pig performance / Groesbeck C. N., Goodband R. D., Tokach M.
498 D., Dritz S. S., Nelssen J. L. and De Rouchey J. M. // Journal of Animal Science, Volume 85,
499 Issue 7, July 2007. С. 1793-1798. doi: 10.2527/jas.2007-0019.
- 500 5. Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design
501 Method / A. Marczuk, A. Blicharz-Kania, P. A. Savinykh [et al.] // Sustainability. – 2019. – Vol.
502 11, No. 19. – P. 5362. – DOI 10.3390/su11195362. – EDN ITXUKG.
- 503 6. Исследование показателей работы роторно-центробежного измельчителя / А. Ю. Исупов,
504 И. И. Иванов, Ю. А. Плотникова, А. И. Сухопаров // АгроЭкоИнженерия. – 2021. – №
505 3(108). – С. 90-99. – DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99. – EDN TYAVLX.
- 506 7. Обзор измельчителей центробежно - роторного принципа действия / М. К. Сердалин, А. С.
507 Бардола, Т. А. Кине, У. К. Сабиев // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и
508 перспективы развития : материалы V международной научно-практической конференции,
509 Омск, 29 апреля 2021 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени
510 П.А. Столыпина, 2021. – С. 112-117. – EDN SJUTWE.
- 511 8. Сухопаров, А. И. Влияние конструктивных параметров центробежно-роторного
512 измельчителя на качественные показатели его работы / А. И. Сухопаров, И. И. Иванов, Ю.
513 А. Плотникова // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного
514 университета. – 2021. – № 3(64). – С. 106-114. – DOI 10.24411/2078-1318-2021-3-106-114. –
515 EDN MLNHAЕ.
- 516 9. Патент на полезную модель № 189365 Российская Федерация. Центробежный
517 измельчитель фуражного зерна / А.М. Абалихин, А.В. Крупин, Т.А. Жукова, Е.А. Долгова;
518 опубл. 21.05.2019. – Бюл. №15. – EDN FYQCTH.
- 519 10. Патент на изобретение № 2752143 Российская Федерация. Центробежный измельчитель
520 сыпучих сельскохозяйственных материалов / М.С. Волхонов, А.М. Абалихин, А.В.
521 Крупин; опубл. 23.07.2021. – Бюл. №21. – EDN JCNIX.
- 522 11. Волхонов, М. С. Анализ эффективности работы нового измельчителя фуражного зерна / М.
523 С. Волхонов, А. М. Абалихин, А. В. Крупин // Известия Санкт-Петербургского
524 государственного аграрного университета. – 2020. – № 60. – С. 124-131. – DOI
525 10.24411/2078-1318-2020-13124. – EDN SJAXUG.
- 526 12. Studying The Operational Efficiency of The Centrifugal Impact Feed Grain Crusher of The New
527 Design / M. Volkhonov, A. Abalikhin, A. Krupin, I. Maksimov // Eastern-European Journal of

- 528 Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 5, No. 1(107). – P. 44-51. – DOI 10.15587/1729-
529 4061.2020.212994. – EDN WAKJCE.
- 530 13. Определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного
531 зерна / М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, Д. В. Барабанов [и др.] // Аграрная наука. – 2023.
532 – № 6. – С. 111-115. – DOI 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115. – EDN YBKWVP.

533 References

- 534 1. Providing for quality grinding grain for the implementation of the biological potential of
535 productive animals / A. T. Lebedev, R. V. Pavlyuk, A. V. Zaharin, P. A. Lebedev // Research
536 Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, No. 2. – P. 1525-
537 1528. – EDN NNJCL.
- 538 2. Investigations in feeding device of grain crusher / P. Savinyh, V. Kazakov, A. Moshonkin, S.
539 Ivanovs // Engineering for Rural Development, Jelgava, 22–24 may 2019 years. Vol. 18. –
540 Jelgava: Without a publisher, 2019. – P. 123-128. – DOI 10.22616/ERDev2019.18.N165. – EDN
541 TMYVNW.
- 542 3. Ryule M. How the particle size changes during granulation / M. Ryule // Compound feed. – 2020.
543 – No. 6. – P. 34-36. – EDN CCZYPO.
- 544 4. Diet mixing time affects nursery pig performance / Groesbeck C. N., Goodband R. D., Tokach M.
545 D., Dritz S. S., Nelssen J. L. and De Rouchey J. M. // Journal of Animal Science, Volume 85,
546 Issue 7, July 2007. P. 1793-1798. doi: 10.2527/jas.2007-0019.
- 547 5. Studies of a Rotary-Centrifugal Grain Grinder Using a Multifactorial Experimental Design
548 Method / A. Marczuk, A. Blicharz-Kania, P. A. Savinykh [et al.] // Sustainability. – 2019. – Vol.
549 11, No. 19. – P. 5362. – DOI 10.3390/su11195362. – EDN ITXUKG.
- 550 6. Investigation of the performance indicators of a rotary-centrifugal shredder / A. Yu. Isupov, I. I.
551 Ivanov, Yu. A. Plotnikova, A. I. Sukhoparov // Agroecoengineering. – 2021. – No. 3(108). – P.
552 90-99. – DOI 10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99. – EDN TYAVLX.
- 553 7. Review of shredders of centrifugal - rotary principle of action / M. K. Serdalin, A. S. Bardola, T.
554 A. Kine, U. K. Sabiev // Scientific and technical support of agroindustrial complex, state and
555 prospects of development : materials of the V International scientific and practical conference,
556 Omsk, April 29, 2021. – Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2021.
557 – P. 112-117. – EDN SJUTWE.
- 558 8. Sukhoparov, A. I. Influence of design parameters of a centrifugal-rotary shredder on the quality
559 indicators of its operation / A. I. Sukhoparov, I. I. Ivanov, Yu. A. Plotnikova // Proceedings of the
560 St. Petersburg State Agrarian University. – 2021. – No. 3(64). – P. 106-114. – DOI
561 10.24411/2078-1318-2021-3-106-114. – EDN MLNHAЕ.
- 562 9. Utility Model Patent № 189365 Russian Federation. Centrifugal shredder of feed grain / A.M.
563 Abalikhin, A.V. Krupin, T.A. Zhukova, E.A. Dolgova; publ. 21.05.2019. – Bul. No. 15. – EDN
564 FYQCTH.
- 565 10. Patent for invention № 2752143 Russian Federation. Centrifugal shredder of bulk agricultural
566 materials / M.S. Volkhonov, A.M. Abalikhin, A.V. Krupin; publ. 23.07.2021. – Bul. No. 21. –
567 EDN JICNIX.
- 568 11. Volkhonov, M. S. Analysis of the efficiency of the new feed grain shredder / M. S. Volkhonov,
569 A.M. Abalikhin, A.V. Krupin // Izvestiya of the St. Petersburg State Agrarian University. – 2020.
570 – No. 60. – P. 124-131. – DOI 10.24411/2078-1318-2020-13124. – EDN SJAXUG.
- 571 12. Studying The Operational Efficiency of The Centrifugal Impact Feed Grain Crusher of The New
572 Design / M. Volkhonov, A. Abalikhin, A. Krupin, I. Maksimov // Eastern-European Journal of
573 Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 5, No. 1(107). – P. 44-51. – DOI 10.15587/1729-
574 4061.2020.212994. – EDN WAKJCE.

- 575 13. Determination of optimal modes of operation of centrifugal fodder grain grinder / M.S.
576 Volkhonov, A.M. Abalikhin, D.V. Barabanov, A.V. Krupin, N.V. Mukhanov [et al.] // Agrarian
577 Science. – 2023. – No. 6. – P. 111-115. – DOI 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115. – EDN
578 YBKWVP.

579 © Абалихин¹ А. М., Барабанов² Д. В., Крупин³ А. В., Муханов⁴ Н. В., 2023