

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363.7

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-17-22



## Определение оптимальных конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетками в торцевых поверхностях

**Савиных Петр Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник<sup>1</sup>

priemnaya@fanc-sv.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>, AuthorID426517

**Турубанов Николай Валентинович**✉, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник<sup>1</sup>

nikolaytu@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1446-6851>, AuthorID455809

**Мошонкин Александр Михайлович**, канд. техн. наук, доцент<sup>2</sup>

a.moshonkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>, AuthorID858451

<sup>1</sup> Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого; 610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, 166а

<sup>2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

**Аннотация.** Измельчение зерна при подготовке зерновых кормов в хозяйствах осуществляется в основном на молотковых дробилках. Для получения более качественного готового продукта с меньшими энергетическими затратами необходимо определить оптимальные конструктивно-технологические параметры молотковой дробилки. С этой целью в лаборатории механизации животноводства разработана молотковая дробилка с решетками в торцевых поверхностях, позволяющая производить регулировку сечения отверстий решёт без их замены. На производственной базе ФАНЦ Северо-Востока проведены экспериментальные исследования по определению влияния изменения конструктивно-технологических параметров на основные показатели её работы. По результатам исследований получены математические модели рабочего процесса молотковой дробилки, согласно которым наилучшими конструктивно-технологическими параметрами молотковой дробилки являются площадь отверстий решёт 58,6 мм<sup>2</sup>, высота кольца сепарации материала 40 мм и площадь воздушного фильтра воздуха 6 м<sup>2</sup>. При этом пропускная способность дробилки составляет 1,23 т/ч, удельные энергозатраты – 3,44 кВт·ч/(т·ед.ст.изм.), средний размер измельченных частиц – 1,45 мм, процентное содержание целых зерен в готовом продукте – 0,17%.

**Ключевые слова:** дробилка, измельчение зерна, математические модели, решето, площадь отверстий решёт, высота кольца сепарации материала, площадь воздушного фильтра, удельные энергозатраты

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» (тема № FNWE-2022-0002).

**Благодарности.** Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Формат цитирования:** Савиных П.А., Турубанов Н.В., Мошонкин А.М. Определение оптимальных конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетками в торцевых поверхностях // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 5. С. 17-22. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22>.

© Савиных П.А., Турубанов Н.В., Мошонкин А.М., 2023

## ORIGINAL PAPER

**Determination of optimal design and technological parameters of a hammer crusher with sieves in end surfaces**

*Petr A. Savinyh, DSc (Eng), Professor, Chief Research Associate, Head of the Laboratory<sup>1</sup>*  
priemnaya@fanc-sv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>, AuthorID426517

*Nikolay V. Turubanov<sup>✉</sup>, PhD (Eng), Associate Professor, Senior Research Associate<sup>1</sup>*  
nikolaytu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1446-6851>, AuthorID455809

*Aleksandr M. Moshonkin, PhD (Eng), Associate Professor<sup>2</sup>*  
info@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6624-4847>, AuthorID858451

<sup>1</sup>Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky, 166a, Lenina str., Kirov, 610007, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

**Abstract.** When preparing compound feeds, the main machines used for grain crushing are hammer crushers. To obtain a better-quality finished product with lower energy costs, it is necessary to determine the optimal design and technological parameters of a hammer crusher. To this end, the laboratory of livestock production mechanization has designed a hammer crusher with sieves in the end surfaces. The hammer crusher has adjustable cross-sections of the sieve holes, so there is no need to replace the sieves. Experimental studies have been carried out at the production facilities of the North-East Federal Agency of Scientific Institutions to determine the impact of changes in structural and technological parameters of the crusher on its main performance indicators. According to the results of experimental studies, mathematical models of the working process of the hammer crusher have been obtained. As a result, the optimal design and technological parameters of the hammer crusher have been determined: the area of the sieve openings 58.6 mm<sup>2</sup>; the height of the material separation ring 40 mm and the size of the air filter area 6 m<sup>2</sup>, while the throughput capacity of the crusher is 1.23 t/h, specific energy consumption is 3.44 kWh/(t×units of fineness degree), the average size of crushed particles is 1.45 mm, the share of whole grains in the finished product is 0.17%.

**Keywords:** crusher, grain crushing, mathematical models, sieve, area of sieve openings, height of material separation ring, air filter area, specific energy consumption.

**Funding.** The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal Agrarian Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitskiy” (topic No. FNWE-2022-0002).

**Acknowledgements.** The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

**For citation:** Savinyh P.A., Turubanov N.V., Moshonkin A.M. Determination of optimal design and technological parameters of a hammer crusher with sieves in end surfaces. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023; 25(5):17-22. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22>.

**Введение.** При подготовке зерновых кормов к скармливанию основной технологической операцией является измельчение. При измельчении снижается прочность зерновки, образуется множество частиц и увеличивается поверхность корма, за счёт чего улучшается его усвояемость [1-3]. При приготовлении комбикормов дроблённые компоненты более равномерно перемешиваются [4]. В основном для измельчения зерна в хозяйствах используются простые в эксплуатации молотковые дробилки, позволяющие получать дерть различного помола в зависимости от зоотехнических требований и перерабатывать большинство используемых концентрированных кормов.

Широкое распространение получили дробилки, в которых в качестве сепарирующего элемента используется решето, его достаточно просто менять

при поломке и легко подобрать необходимый размер отверстий. Для получения более качественного готового продукта и снижения энергоёмкости его получения необходимо более глубокое изучение рабочего процесса дробилок.

**Цель исследований:** провести оптимизацию конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетами в торцевых поверхностях.

Научная новизна работы заключается в получении математических моделей процесса измельчения зерновых материалов в молотковой дробилке, позволяющих определить оптимальные показатели её работы.

**Материалы и методы.** В лаборатории механизации животноводства ФАНЦ Северо-Востока разработана молотковая дробилка с решетами в торцевых поверхностях (патент на изобретение № RU2338441).

Проведены экспериментальные исследования по определению влияния конструктивно-технологических факторов на основные показатели её работы.

В корпусе дробилки 1 размещены молотковый ротор 2 с подвешенными на стержнях молотками 3, дека 4, охватывающая по периметру дробильную камеру 5, неподвижные 6 и подвижные 7 решета и вентилятор 8. Материал в дробилку подается загрузочным устройством 9 (рис.).

В начале работы через загрузочное устройство 9 воздушным потоком, создаваемым за счёт разрежения вентилятором 8, материал подаётся в дробильную камеру 5, где под действием молотков 3 молоткового ротора 2 и деки 4 подвергается измельчению. Готовый продукт выводится из дробильной камеры воздушным потоком через подвижные 7 и неподвижные 6 решета и далее вентилятором 8 направляется на выгрузку. Подвижные решета 7, установленные с возможностью перемещения относительно неподвижных 6, позволяют регулировать крупность помола за счёт изменения площади отверстий.

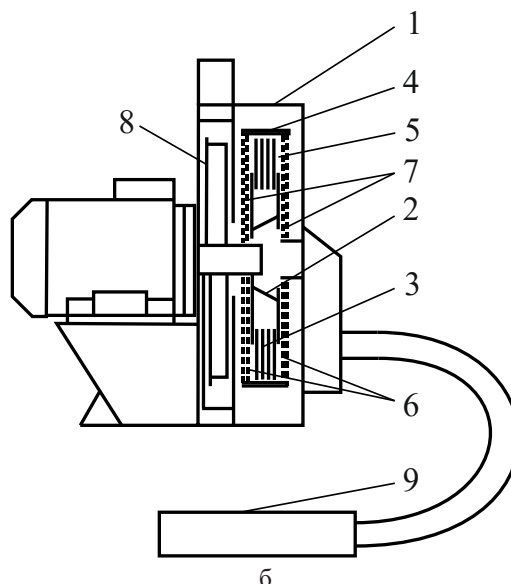
Мощность, затрачиваемую ротором дробилки на измельчение зерна, можно определить по формуле [5]:

$$N_{\text{эф}} = N_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{рх}}$$

где  $N_{\text{эл}}$  – мощность, замеренная ваттметром, кВт;  $\eta_{\text{рх}}$  – КПД электродвигателя.



а



б

**Рис. Дробилка, общий вид (а) и схема (б):**

- 1 – корпус; 2 – молотковый ротор; 3 – молотки; 4 – дека;  
5 – дробильная камера; 6 – неподвижные решета;  
7 – подвижные решета; 8 – вентилятор; 9 – загрузочное устройство

**Fig. Crusher (a) general view; (b) structural diagram:**

- 1 – housing; 2 – hammer rotor; 3 – hammers; 4 – deck;  
5 – crushing chamber; 6 – fixed sieves; 7 – movable sieves; 8 – fan; 9 – loading device

Удельные энергозатраты ( $q_{\text{эл}}$ , кВт/ч·т), отнесенные к единице массы готового продукта, определяются выражением [5]:

$$q_{\text{эл}} = \frac{N_{\text{эл}}}{Q},$$

где  $Q$  – пропускная способность дробилки при установленном режиме работы, т/ч;

$$Q = \frac{3,6 \cdot G}{t},$$

где  $G$  – масса готового продукта за время опыта, кг;  $t$  – время опыта, с.

Удельные затраты энергии ( $q_{\text{эф}}$ , кВт·ч/т) непосредственно на измельчение зерна [6] составляют:

$$q_{\text{эф}} = \frac{N_{\text{эф}}}{Q}.$$

Удельные энергозатраты электрической энергии  $\mathcal{E}_{\text{эл}}$ , кВт·ч/(т·ед.ст.изм.) с учётом степени измельчения [7] –

$$\mathcal{E}_{\text{эл}} = \frac{N_{\text{эл}}}{Q \cdot \lambda},$$

где  $\lambda$  – степень измельчения;

$$\lambda = \frac{D_{\text{экв}}}{d_{\text{ср}}},$$

где  $D_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр зерна;  $d_{\text{ср}}$  – средне-взвешенный размер частиц дерти;

$$D_{\text{экв}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_3}{\pi}},$$

где  $V_3$  – средний объём зерна, определяемый погружением 100 зёрен в мерный цилиндр, частично заполненный жидкостью (бензин, толуол, ксилол).

При определении средне-взвешенного размера частиц дерти из контрольной пробы отбиралась навеска массой 0,1 кг (ГОСТ 13496.0-2016. Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы отбора проб). Навеску помещали в вибрационный классификатор и просеивали в течение 5 мин. Для отсева использовали набор сит с отверстиями: (дно; 0,244; 0,5; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; 3,00) · 10<sup>-3</sup> м. Остаток материала с каждого сита взвешивался на весах ВЛКТ-500 г-М. Для получения более точных результатов анализ каждой пробы проводили в трёхкратной повторности [8, 9].

Средневзвешенный размер частиц дерти определяли по выражению [7]:

$$d_{cp} = \frac{\sum p_i \cdot d_i}{100},$$

где  $p_i$  – массовый остаток на сите, %;  $d_i$  – средний размер частиц, м.

Средневзвешенное квадратическое отклонение и коэффициент вариации рассчитывали по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2 p_i}{\sum p_i}}; \quad v = \frac{1}{\bar{d}} \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2 p_i}{\sum p_i}} \cdot 100,$$

где  $\bar{d}$  – средневзвешенный размер частиц, м.

В эксперименте использовался ячмень влажностью 14...14,5% с эквивалентным диаметром зёрен 4,25 мм.

**Результаты и их обсуждение.** Однофакторные экспериментальные исследования позволили выявить наиболее значимые факторы и уровни их варьирования. Для нахождения оптимальных значений факторов применена методика планирования многофакторного эксперимента [10-12]. При проведении исследований использовался план Бокса-Бенкина, имеющий три уровня с нулевым значением факторов [13].

В качестве исследуемых факторов выбраны площадь отверстий решёт  $k_s$ , мм<sup>2</sup> ( $x_1$ ), высота кольца сепарации материала  $H$ , мм ( $x_2$ ), и величина площади воздушного фильтра  $S_\phi$ , м<sup>2</sup> ( $x_3$ ) (табл.). Площадь отверстий решёт изменяется за счёт перемещения подвижного решета относительно неподвижного в горизонтальном направлении. Величина перемещения контролируется шириной отверстия в горизонтальной плоскости. Высота кольца сепарации материала

регулируется установкой дисков различного диаметра, закрывающих решета. Величина площади воздушного фильтра, установленного на вертикальном смесителе (циклоне), изменяется путём перевязывания его в необходимых точках.

В качестве критериев оптимизации выбраны: пропускная способность  $Q$ , т/ч ( $y_1$ ); удельные энергозатраты  $\mathcal{E}$ , кВт·ч/(т·ед.ст.изм.) ( $y_2$ ); средний размер измельченных частиц  $d_{cp}$ , мм ( $y_3$ ); процентное содержание целых зёрен в готовом продукте  $m$ , % ( $y_4$ ).

После проведения экспериментальных исследований и обработки полученных результатов в программе Statgraphics получены математические модели процесса измельчения материала в молотковой дробилке с решетками в торцевых поверхностях дробильной камеры (незначимые факторы исключены):

$$y_1 = 1,094 + 0,033 \cdot x_1 - 0,042 \cdot x_2 + 0,013 \cdot x_3 + 0,037 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,050 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,028 \cdot x_2^2; \quad (1)$$

$$y_2 = 3,916 - 0,085 \cdot x_2 + 0,054 \cdot x_1^2 - 0,112 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,318 \cdot x_2^2 - 0,180 \cdot x_3^2; \quad (2)$$

$$y_3 = 1,528 + 0,036 \cdot x_1 - 0,053 \cdot x_2 - 0,037 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,087 \cdot x_2^2 - 0,044 \cdot x_3^2; \quad (3)$$

$$y_4 = 0,193 + 0,063 \cdot x_1 + 0,053 \cdot x_2 + 0,022 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,050 \cdot x_2^2 + 0,025 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,043 \cdot x_3^2 \quad (4)$$

Полученные уравнения (1-4) позволяют рассчитывать значения основных показателей работы дробилки в зависимости от величины рассматриваемых факторов. Коэффициент детерминации  $R^2$  для уравнения (1) составил 95,6%; для уравнения (2)  $R^2 = 97,3\%$ ; для (3)  $R^2 = 97,7\%$ ; для (4)  $R^2 = 96,7\%$  [14, 15].

Величину влияния каждого фактора на показатели работы дробилки можно оценить по коэффициентам уравнений (1-4)<sup>1</sup>. Можно сказать, что наибольшее влияние на показатели работы оказывает высота кольца сепарации материала ( $x_2$ ). При уменьшении параметра  $x_2$  воздушный поток, поступающий в камеру измельчения, начинает проходить через воздушно-продуктовый слой в большем объёме и тем самым способствует отводу готового продукта. Таким образом, уменьшение высоты кольца сепарации ( $x_2$ ) способствует увеличению пропускной способности дробилки ( $y_1$ ), удельных энергозатрат ( $y_2$ ), среднего размера измельченных частиц ( $y_3$ ) и снижению количества целых зёрен в готовом продукте ( $y_4$ ).

<sup>1</sup> Сысуев В.А., Исупов А.Ю., Иванов И.И. Результаты экспериментальной части исследования измельчителя зерна центробежно-роторной конструкции // В книге: Проблемы интенсификации животноводства с учётом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза. Фаленты, Варшава, 2019. С. 144-153. EDN: AQUFEK.

Таблица  
Факторы и уровни их варьирования  
Table 1  
Factors and levels of their variation

Уровни варьирования факторов <i>Levels of variation of factors</i>	Факторы / Factors		
	Площадь отверстий решет, $k_s$ , мм <sup>2</sup> <i>Area of the sieve holes, <math>k_s</math>, mm<sup>2</sup></i>	Высота кольца сепарации материала, $H$ , мм <i>Height of the separation ring of the material, <math>H</math>, mm</i>	Площадь воздушного фильтра, $S_\phi$ , м <sup>2</sup> <i>Size of the air filter area, <math>S_\phi</math>, m<sup>2</sup></i>
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Верхний (+) <i>Upper</i>	78	120	6
Средний (0) <i>Middle</i>	68	80	4
Нижний (-) <i>Lower</i>	58	40	2



На процентное содержание целых зерен в готовом продукте ( $y_4$ ) наибольшее влияние оказывает площадь отверстий решёт ( $x_1$ ). При уменьшении параметра  $x_1$  происходит снижение содержания целых зёрен ( $y_4$ ).

Величина площади воздушного фильтра ( $x_3$ ) оказывает существенное влияние на удельные энергозатраты ( $y_2$ ), средний размер измельченных частиц ( $y_3$ ) и количество целых зёрен в готовом продукте ( $y_4$ ). На пропускную способность молотковой дробилки ( $y_1$ ) фактор ( $x_3$ ) оказывает незначительное влияние.

Согласно полученным моделям (1-4) максимальное значение пропускной способности молотковой дробилки  $y_1 = 1,23$  т/ч достигается при площади отверстий решёт  $58,63$  мм<sup>2</sup>, высоте кольца сепарации  $40$  мм и величине площади воздушного фильтра  $6$  м<sup>2</sup>. Средний размер измельченных частиц  $y_2 = 1,58$  мм достигается при площади отверстий решёт  $78$  мм<sup>2</sup>, высоте кольца сепарации  $67,74$  мм и величине площади воздушного фильтра  $3,16$  м<sup>2</sup>. Минимальное значение удельных энергозатрат  $y_3 = 3,28$  кВт·ч/(т·ед.ст.изм.)

достигается при площади отверстий решёт  $78$  мм<sup>2</sup>, высоте кольца сепарации  $120$  мм и величине площади воздушного фильтра  $2$  м<sup>2</sup>. Минимальное значение процентного содержания целых зёрен в готовом продукте  $y_4 = 0,12\%$  достигается при площади отверстий решёт  $58$  мм<sup>2</sup>, высоте кольца сепарации  $66,8$  мм и величине площади воздушного фильтра  $4,19$  м<sup>2</sup>.

## Выводы

Полученные математические модели позволяют сделать вывод о том, что наилучшими конструктивно-технологическими параметрами молотковой дробилки являются: площадь отверстий решёт  $58,6$  мм<sup>2</sup>; высота кольца сепарации материала  $40$  мм; величина площади воздушного фильтра воздуха  $6$  м<sup>2</sup>. При этом пропускная способность дробилки составляет  $1,23$  т/ч, величина удельных энергозатрат –  $3,44$  кВт·ч/(т·ед.ст.изм.), средний размер измельченных частиц –  $1,45$  мм, процентное содержание целых зерен в готовом продукте –  $0,17\%$ .

## Список использованных источников

1. Натынчик Т.М., Радчиков В.Ф., Цай В.П., Бесараб Г.В. Физиологическое состояние и продуктивность бычков при скармливании зерна с разной крупностью измельчения // От инерции к развитию: научно-инновационное обеспечение развития животноводства и биотехнологий: Сборник материалов Международной научно-практической конференции «От инерции к развитию: научно-инновационное обеспечение АПК». 2020. С. 135-138. EDN: FTAVSK.
2. Радчикова Г.Н., Богданович Д.М., Медведева Д.В., Васильюк О.Я., Марусич А.Г. Влияние степени измельчения зерна на физиологическое состояние, обмен веществ и продуктивность молодняка крупного рогатого скота // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2022. № 25-1. С. 224-231. EDN: WPLSCQ.
3. Радчиков В.Ф., Кот А.Н., Цай В.П., Бесараб Г.В. и др. Физиологическое состояние и продуктивность бычков при скармливании зерна с разной степенью измельчения // Инновационные технологии в сельском хозяйстве, ветеринарии и пищевой промышленности: Материалы 83-й Международной научно-практической конференции. 2018. С. 117-123. EDN: YLRBEL.
4. Savinyh P., Aleshkin A., Turbanov N., Ivanovs S. Investigation of impact of technological and structural parameters upon energy indicators of work of mixer // Engineering for rural development. 2020. № 19. Pp. 1338-1348. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF334>
5. Федоренко И.Я. Методологические аспекты экспериментальной оптимизации процесса измельчения кормового зерна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 5 (199). С. 101-107. EDN: XCTRAV.
6. Сундеев А.А., Воронин В.В., Акименко А.В. Сравнительная оценка энергетических показателей измельчения зерна молотковыми дробилками // Наука и образование в современных условиях: Материалы Международной научной конференции. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. С. 368-371. EDN: VZFJBN.
7. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Низовцев С.Л., Сергеев А.Г., Мансуров А.П. Оценка рабочих параметров стержневого

## References

1. Natynchik T.M., Radchikov V.F., Tsai V.P., Besarab G.V. Physiological state and productivity of bulls when feeding grain with different grinding sizes. In: *Ot inertsi k razvitiyu: nauchno-innovatsionnoe obespechenie razvitiya zhivotnovodstva i biotekhnologii: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Ot inertsi k razvitiyu: nauchno-innovatsionnoe obespechenie APK"*. 2020:135-138. (In Rus.)
2. Radchikova G.N., Bogdanovich D.M., Medvedeva D.V., Vasilyuk O.Ya., Marusich A.G. Influence of the degree of grain grinding on the physiological state, metabolism and productivity of young cattle. *Aktualnye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva*. 2022;25-1:224-231. (In Rus.)
3. Radchikov V.F., Kot A.N., Tsai V.P., Besarab G.V. Physiological state and productivity of bulls when feeding grain with different grinding sizes. In: *Ot inertsi k razvitiyu: nauchno-innovatsionnoe obespechenie razvitiya zhivotnovodstva i biotekhnologii: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Ot inertsi k razvitiyu: nauchno-innovatsionnoe obespechenie APK"*. 2018:117-123. (In Rus.)
4. Savinyh P., Aleshkin A., Turbanov N., Ivanovs S. Investigation of the impact of technological and structural parameters upon energy indicators of work of mixer. *Engineering for rural development*. 2020;19:1338-1348. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF334>
5. Fedorenko I.Ya. Methodological aspects of experimental optimization of the process of grinding feed grain. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;5(199):101-107. (In Rus.)
6. Sundeev A.A., Voronin V.V., Akimenko A.V. Comparative evaluation of energy indicators of grain crushing by hammer crushers. In: *Nauka i obrazovanie v sovremennykh usloviyakh. Proceedings of the international scientific conference. Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I*. 2016:368-371. (In Rus.)
7. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovtsev S.L., Sergeev A.G., Mansurov A.P. Evaluation of the operating parameters of a rod crusher when crushing wet grain. *Bulletin NGIEI*. 2022;10(137):48-58. (In Rus.)
8. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Konovalov V.I., Konovalova A.A. On determining the rational parameters of a hammer crusher

измельчителя при измельчении влажного зерна // Вестник НГИ-ЭИ. 2022. № 10 (137). С. 48-58. EDN: XVFWMJ.

8. Балданов М.Б., Сергеев Ю.А., Коновалов В.И., Коновалова А.А. О выборе рациональных параметров молотковой дробилки с монолитным молотком // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 1 (76). С. 55-60. EDN: OQGDDE.

9. Казаков В.А., Мошонкин А.М. Усовершенствование питающего устройства двухступенчатой плющилки зерна // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России: Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию академика Д.К. Беляева. 2017. Т. 3. С. 75-79. EDN: YRAJLD.

10. Marczuk A., Blicharz-Kania A., Savinykh P.A., Isupov A. Yu., Palichyn A.V., Ivanov I.I. Studies of a rotary-centrifugal grain grinder using a multifactorial experimental design method. *Sustainability*. 2019. № 11 (19). P. 5362. <https://doi.org/10.3390/su11195362>

11. Кومانов П.А., Тавасиев Д.А. Разработка методики по проведению эксперимента на примере полного факторного эксперимента // Академическая публицистика. 2019. № 12. С. 50-52. EDN: EXJVJN.

12. Зверев С.В., Косолапов В.М., Тютюнов С.И., Ставцев А.Э. Оптимизация режимных параметров молотковой дробилки при производстве кормов из зерна люпина белого сорта Дега // Кормопроизводство. 2021. № 2. С. 36-41. EDN: MBJYRO.

13. Казаков В.А., Мошонкин А.М. Экспериментальные исследования питающего устройства плющилки зерна // Энергосберегающие агротехнологии и техника для северного земледелия и животноводства: Международная научная конференция «Энергосберегающие агротехнологии. Техника для северного земледелия и животноводства»; семинар для молодых ученых «Методика научных исследований в механизации сельского хозяйства». Киров: ООО «Кировская областная типография», 2018. С. 218-225. EDN: VTDCQJ.

14. Миронов К.Е., Оболенский Н.В., Гоева В.В., Гришин Н.Е. Разработка и исследование рабочего процесса измельчения зерна дробилки ударно-отражательного действия // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14, № 1 (52). С. 100-106. EDN: ZIJUBN.

15. Исупов А.Ю., Иванов И.И., Плотникова Ю.А., Сухопаров А.И. Исследование показателей работы роторно-центробежного измельчителя // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 3 (108). С. 90-99. EDN TYAVLX.

with a monolithic hammer. *Vestnik VSGUTU*. 2020;1(76):55-60. (In Rus.)

9. Kazakov V.A., Moshonkin A.M. Improvement of the feeding device of a two-stage grain flattener. In: *Agrarnaya nauka v usloviyakh modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya APK Rossii. Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of Academician D.K. Belyaev*. 2017:75-79. (In Rus.)

10. Marczuk A., Blicharz-Kania A., Savinykh P.A., Isupov A. Yu., Palichyn A.V., Ivanov I.I. Studies of a rotary-centrifugal grain grinder using a multifactorial experimental design method. *Sustainability*. 2019;11(19):5362. <https://doi.org/10.3390/su11195362>

11. Komanov P.A., Tavasiev D.A. Development of a methodology for conducting an experiment on the example of a complete factor experiment. *Akademicheskaya publitsistika*. 2019;12:50-52. (In Rus.)

12. Zverev S.V., Kosolapov V.M., Tyutyunov S.I., Stavtsev A.E. Optimization of the operating parameters of a hammer crusher in the production of feed from white dega lupine grain. *Kormoproizvodstvo*. 2021;2:36-41. (In Rus.)

13. Kazakov V.A., Moshonkin A.M. Experimental studies of the feeding device of the grain crusher. In: *Energoberegayushchie agrotekhnologii i tekhnika dlya severnogo zemledeliya i zhivotnovodstva*. 2018:218-225. (In Rus.)

14. Mironov K.E., Obolensky N.V., Goeva V.V., Grishin N.E. Development and research of the working process of grain crushing by an impact-reflective crusher. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019;14(1):100-106. (In Rus.)

15. Isupov A. Yu., Ivanov I.I., Plotnikova Yu.A., Sukhoparov A.I. Investigation of performance indicators of a rotary-centrifugal chrusher. *Agroekozhineriya*. 2021;3(108):90-99. (In Rus.)

#### Критерии авторства

П.А. Савиных – концептуализация, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

Н.В. Турубанов – информационные ресурсы, аналитика, создание черновика рукописи

А.М. Мошонкин – описание результатов, анализ литературы

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 30.03.2023, после рецензирования и доработки 11.09.2023, принята к публикации 18.09.2023

#### Authors' contribution

P.A. Savinykh – conceptualization, methodology, manuscript finalizing and editing

N.V. Turubanov – information resources, analytics, original draft preparation;

A.M. Moshonkin – description of results, literature review

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 30.03.2023; revised 11.09.2023; accepted 18.09.2023