

УДК 636.085.622; 631.363.21

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115

М.С. Волхонов¹,
А.М. Абалихин², ✉
Д.В. Барабанов²,
А.В. Крупин²,
Н.В. Муханов²

¹Костромская государственная сельскохозяйственная академия пос. Караваяво, Костромская обл., Россия

²Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет, Иваново, Россия

✉ anton-abalikhin@yandex.ru

Received by the editorial office:
22.03.2023Accepted in revised:
04.05.2023Accepted for publication:
18.05.2023

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115

Mikhail S. Volkhonov¹,
Anton M. Abalikhin², ✉
Dmitry V. Barabanov²,
Alexander V. Krupin²,
Nikolay V. Mukhanov²

¹Kostroma State Agricultural Academy, Karavaevo village, Kostroma district, Russia

²Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biotechnology, Ivanovo, Russia

✉ anton-abalikhin@yandex.ru

Поступила в редакцию:
22.03.2023Одобрена после рецензирования:
04.05.2023Принята к публикации:
18.05.2023

Определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного зерна

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Фуражное зерно — важный элемент рационов сельскохозяйственных животных и птицы. Его измельчение — обязательная операция подготовки к скармливанию, которая осуществляется на большинстве предприятий молотковыми дробилками, одним из основных недостатков которых является высокая удельная энергоёмкость, поэтому разработка измельчителя, обеспечивающего измельчение фуражного зерна с меньшей удельной энергоёмкостью, актуальна. Цель исследования — определение оптимальных режимов работы разработанного центробежного измельчителя фуражного зерна при использовании решет с отверстиями диаметром 4, 6 и 8 мм.

Результаты. Определено, что наибольшее влияние на удельную энергоёмкость процесса измельчения зерна оказывают диаметр отверстий решета и частота вращения ротора. Для определения минимальных значений критерия оптимизации функция зависимости удельной энергоёмкости измельчения зерна от частоты вращения ротора была исследована на экстремум. Это позволило определить оптимальные режимы работы измельчителя для решет с отверстиями исследуемых диаметров.

Ключевые слова: фуражное зерно, измельчение зерна, центробежный измельчитель, удельная энергоёмкость

Для цитирования: Волхонов М.С., Абалихин А.М., Барабанов Д.В., Крупин А.В., Муханов Н.В. Определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного зерна. *Аграрная наука.* 2023; 371(6): 111–115, <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115>.

© Волхонов М.С., Абалихин А.М., Барабанов Д.В., Крупин А.В., Муханов Н.В.

Determination of optimal modes of operation of centrifugal fodder grain grinder

ABSTRACT

Relevance. Grain fodder is an important element in the diets of farm animals and poultry. Its grinding is a mandatory preparation operation for feeding, which is carried out at most enterprises with hammer mills, one of the main disadvantages of which is high energy density. Therefore, the development of a grinder that provides grinding of fodder grain with a lower energy density is relevant. The purpose of the study is to determine the optimal operating modes of the developed centrifugal fodder grain grinder when using sieves with holes with a diameter of 4, 6 and 8 mm.

Results. It has been determined that the diameter of the screen holes and the rotor speed have the greatest influence on the specific energy consumption of the grain grinding process. To determine the minimum values of the optimization criterion, the function of the dependence of the specific energy density of grain grinding on the rotor speed was studied by extremum. This made it possible to determine the optimal operating modes of the grinder for sieves with holes of the studied diameters.

Key words: fodder grain, grain grinding, centrifugal grinder, specific energy intensity

For citation: Volkhonov M.S., Abalikhin A.M., Barabanov D.V., Krupin A.V., Mukhanov N.V. Determination of optimal modes of operation of centrifugal fodder grain grinder. *Agrarian science.* 2023; 371(6): 111–115 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-111-115>

© Volkhonov M.S., Abalikhin A.M., Barabanov D.V., Krupin A.V., Mukhanov N.V.

Введение / Introduction

Существенное увеличение производства продукции животноводства возможно лишь при обеспечении животных кормами в необходимом количестве и требуемого качества. Применительно к фуражному зерну требованиями качества являются его измельчение и получение дерты с крупностью частиц, оптимальной для каждой половозрастной группы определенного вида сельскохозяйственных животных и птицы. Скармливание дерты с оптимальным для животных размером частиц способствует нормальному протеканию различных обменных процессов в организме с повышением усвояемости питательных веществ корма, что обуславливает рост продуктивности животных [1–4].

Измельчение фуражного зерна является обязательной (и наиболее энергоемкой) операцией при приготовлении кормов [5, 6]. На сегодняшний день измельчение большей части фуражного зерна на предприятиях АПК РФ осуществляется молотковыми дробилками, которым присущи высокая удельная энергоемкость процесса и значительная доля переизмельченного материала в дерты [6–8]. Поэтому разработка новых технических средств, обеспечивающих снижение энергоемкости процесса измельчения и получение из фуражного зерна дерты требуемой крупности, является актуальной задачей. Одним из перспективных направлений развития конструирования измельчителей фуражного зерна является разработка центробежных измельчителей с жестко закрепленными лопатками ротора [3, 9–12].

Цель исследования — определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного зерна при использовании решет с отверстиями диаметром 4, 6 и 8 мм.

Материалы и методы исследований / Materials and methods

Исследование проведено в январе 2023 года в лаборатории кафедры технического сервиса и механики Ивановской ГСХА.

Объект исследования — технологический процесс измельчения фуражного зерна в центробежном измельчителе. Предмет исследования — режимные параметры центробежного измельчителя фуражного зерна.

Центробежный измельчитель (рис. 1а) содержит корпус рабочей камеры 1, который приварен к задней

стенке 2, а передняя стенка 3 (съемная) прижимается к корпусу 1 четырьмя шпильками 4.

В нижней части корпус рабочей камеры 1 имеет выгрузную горловину, к фланцу которой крепится фильтр-мешок 5. Бункер 6 с регулировочной заслонкой 7 крепится к передней стенке 3 посредством загрузочной горловины 8, которая имеет на боковой поверхности отверстие 9 для отбора воздуха.

Задняя стенка 2 крепится к станине 10, которая установлена на виброопорах 11. Станина 10 выполнена в форме пространственного каркаса, внутри которого расположены электродвигатель 12 и клиноременная передача 13. В корпусе подшипников 14 установлен вал ротора 15, получающий вращение от электродвигателя 12 посредством клиноременной передачи 13.

Устройство рабочей камеры 1 и ротора 15 показано на рисунках 1б и 1в соответственно. В корпусе рабочей камеры 1 (рис. 1б) располагаются ротор 15, дека 16 и решето 17. Дека 16 содержит 14 отбойников трапецевидного сечения, закрепленных на радиально изогнутой пластине. Дека 16 и решето 17 охватывают ротор 15 и крепятся к кронштейнам 18.

Ротор 15 (рис. 1в) представляет собой два диска сплошного 19 и кольцевого 20 сечения, между которыми располагаются 8 лопаток 21. К сплошному диску приварена ступица 22.

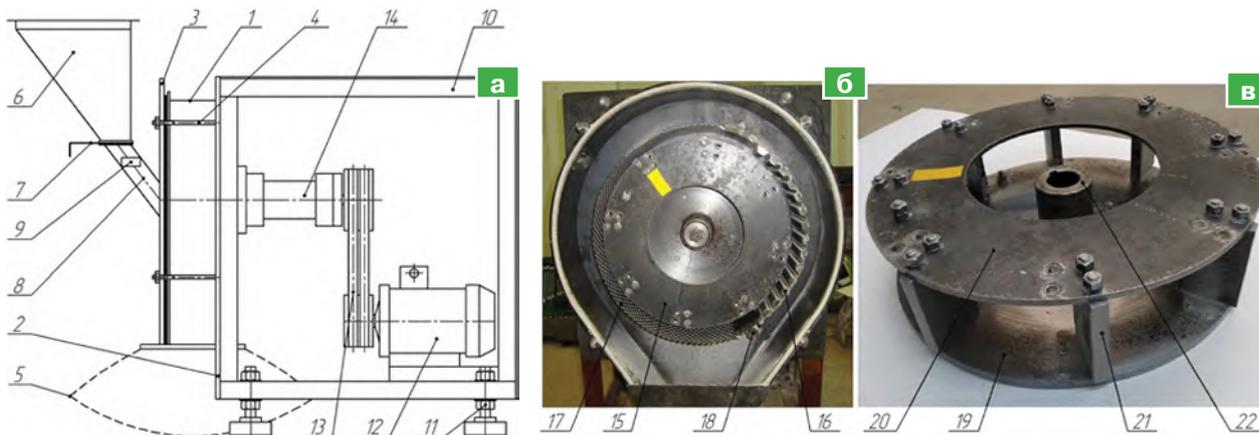
Для исследования работы измельчителя и построения математической модели, отражающей влияние факторов на критерий оптимизации, проведен трехфакторный трехуровневый эксперимент.

За критерий оптимизации принята удельная энергоемкость \mathcal{E} , Вт·ч / (кг·ед. ст. изм.), которая определяется как отношение потребляемой мощности к произведению степени измельчения на производительность измельчителя зерна. Условие оптимизации — $\mathcal{E} \rightarrow \min$.

В качестве факторов приняты: частота вращения ротора n , мин⁻¹; площадь выгрузного окна бункера F , м²; диаметр отверстий решета D , м. Пределы варьирования частоты вращения ротора приняты из условия достижимости необходимой скорости вылета частиц с лопаток ротора: $n = 2500\text{--}3500$ мин⁻¹ [13]. Площадь выгрузного окна бункера варьировалась в пределах $F = 0,000702\text{--}0,001458$ м² исходя из полного использования мощности электродвигателя привода ротора, равной 5,5 кВт при максимально возможной

Рис. 1. Устройство центробежного измельчителя: а — схема измельчителя, б — камера рабочая (передняя стенка снята), в — ротор

Fig. 1. Centrifugal grinder device: а — diagram of the fodder grain grinder, б — working chamber (front wall removed), в — rotor



1 — корпус рабочей камеры, 2 — задняя стенка, 3 — передняя стенка, 4 — шпилька, 5 — фильтр-мешок, 6 — бункер, 7 — заслонка регулировочная, 8 — горловина загрузочная, 9 — отверстие, 10 — станина, 11 — виброопора, 12 — электродвигатель, 13 — передача клиноременная, 14 — корпус подшипников, 15 — ротор, 16 — дека, 17 — решето, 18 — кронштейн, 19 — диск сплошной, 20 — диск кольцевой, 21 — лопатка, 22 — ступица

производительности 1,8 т/ч. Использовались решета с диаметрами отверстий $D = 0,004$ м, $D = 0,006$ м, $D = 0,008$ м для получения дерти мелкого, среднего и крупного помола в соответствии с зоотехническими требованиями для различных видов и половозрастных групп сельскохозяйственных животных.

В качестве материала для проведения экспериментальных исследований использовалось фуражное зерно пшеницы сорта Приокская влажностью 12%.

Испытания проводили следующим образом. В рабочую камеру устанавливали решето с отверстиями необходимого диаметра. Перемещали регулировочную заслонку и фиксировали в определенном положении для обеспечения необходимой площади выгрузного окна бункера. Запускали электродвигатель привода ротора измельчителя и частотным регулятором устанавливали необходимую частоту вращения ротора.

Отмеренная на весах порция зерна загружалась в бункер. По загрузочной горловине поток зерна двигался в корпус рабочей камеры и поступал на вращающийся ротор. С лопаток ротора зерна вылетали со скоростью 72–101 м/с (в зависимости от частоты вращения ротора) и разрушались, ударяясь о поверхность отбойников деки [13]. Образовавшиеся при разрушении зерен частицы дерти потоком воздуха, создающимся при вращении ротора, проходя через отверстия решета, поступали в выгрузную горловину. Если размер измельченных частиц не позволял им пройти через отверстия решета, то они, вращаясь в воздушно-продуктовом слое, попадали на лопатки ротора и вновь направлялись на деку, подвергаясь повторным ударам об отбойники до тех пор, пока не измельчались до размера, обеспечивающего возможность прохода сквозь отверстия решета. Полученная дерть накапливалась в фильтр-мешке, сквозь ткань которого свободно проходил воздушный поток.

Наличием на боковой поверхности загрузочной горловины (рис. 1а) отверстия обеспечивались (при вращающемся роторе) отбор воздуха из атмосферы и поступление его в рабочую камеру. При этом воздух поступал в рабочую камеру постоянно и равномерно. Поток воздуха обеспечивал очистку рабочих органов измельчителя от дерти и ее эвакуацию из рабочей камеры. Своевременная эвакуация дерти способствует получению размла заданного гранулометрического состава, повышению производительности и эксплуатационной надежности измельчителя.

В ходе каждого опыта по секундомеру определяли продолжительность измельчения порции зерна и рассчитывали производительность измельчителя как отношение массы порции к продолжительности ее измельчения. Частоту вращения ротора изменяли при помощи подключенного к электродвигателю преобразователя частоты электрического тока Innovert ITD 113043В (подключаемая мощность — до 11,0 кВт, напряжение — 380 В, страна производства — КНР). По показаниям амперметра, интегрированного в преобразователь частоты электрического тока, определяли силу тока, потребляемого электродвигателем во время его работы, и рассчитывали мощность, затрачиваемую на процесс измельчения.

Из каждой порции полученной дерти отбирали пробы по ГОСТ 13496.0-2016¹, проводили ситовой анализ

по ГОСТ 13496.8-72² для определения гранулометрического состава, рассчитывали средний размер частиц дерти и степень измельчения зерна. Затем определялась величина удельной энергоемкости с учетом достигнутой степени измельчения.

После проведения эксперимента полученные данные подвергались статистической обработке в программе Statgraphics Plus (Statgraphics Technologies, Inc., USA).

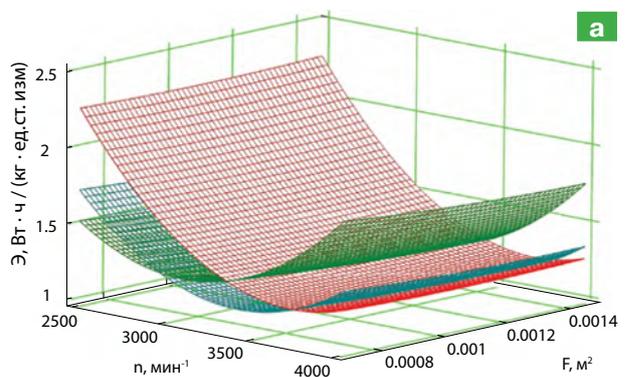
Результаты и обсуждение / Results and discussion

Проведенный многофакторный регрессионный анализ по определению влияния частоты вращения ротора, диаметра отверстий решета, площади выгрузного окна бункера на удельную энергоемкость позволил получить математическую модель в виде уравнения регрессии:

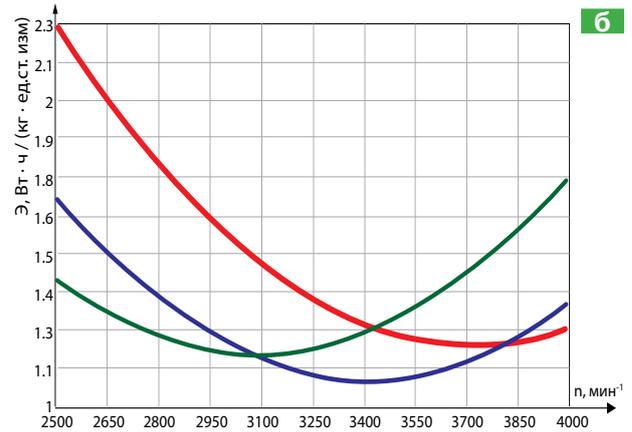
$$\begin{aligned} \Theta = & 15,3123 - 0,0061467 \cdot n - 1213,21368 \cdot D - 141,00204 \cdot F + \\ & + 0,000000708 \cdot n^2 + 41730,25 \cdot D^2 + 119865,493 \cdot F^2 + \\ & + 0,21985 \cdot n \cdot D - 30456,35 \cdot F \cdot D. \end{aligned} \quad (1)$$

Рис. 2. Зависимость удельной энергоемкости измельчения зерна от исследуемых факторов

Fig. 2. Dependence of energy density of grain grinding on the studied factors



а — от площади выгрузного окна бункера и частоты вращения ротора
а — from area of hopper discharge window and rotor speed



б — от частоты вращения ротора
б — from rotor speed

— значение Θ при $D = 0,004$ м, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м²;
— значение Θ при $D = 0,006$ м, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м²;
— значение Θ при $D = 0,008$ м, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м²;
— the meaning of E at the values of $D = 0,004$ м, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м²;
— the meaning of E at the values of $D = 0,006$ м, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м²;
— the meaning of E at the values of $D = 0,008$ м, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м².

¹ ГОСТ 13496.0-2016 Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы отбора проб. М.: Стандартинформ. 2016; 14.

² ГОСТ 13496.8-72 Методы определения крупности размла и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. М.: Стандартинформ. 2011; 3.

Из дисперсионного анализа уравнения регрессии следует, что модель адекватно описывает работу измельчителя и позволяет определить величину критерия оптимизации при различных значениях факторов.

Удельная энергоёмкость изменялась в широких пределах — 1–2,25 Вт·ч / (кг·ед. ст. изм.) (рис. 2а).

При этом влияние изменения площади выгрузного окна бункера незначительно, так как при уменьшении подачи зерна в рабочую камеру в единицу времени снижается и расход энергии на его измельчение. Наибольшее влияние на удельную энергоёмкость процесса измельчения зерна оказывают диаметр отверстий решета и частота вращения ротора. Это объясняется тем, что при использовании решета с отверстиями меньшего диаметра требуется более длительная циркуляция материала в рабочей камере для большей кратности соударений зерна с декой и получения частиц дерти с размерами, дающими возможность прохода сквозь отверстия решета. При этом существенно снижается производительность измельчителя, а удельная энергоёмкость возрастает, даже несмотря на некоторое увеличение степени измельчения.

Изменение частоты вращения ротора приводит к изменению кинематики движения частиц материала в рабочей камере: изменяются скорость и угол вылета частиц с лопатки ротора, траектория движения от точки схода с лопатки ротора до точки удара о поверхность отбойника деки и угол соударения частицы с поверхностью отбойника. Все эти изменения влияют на характер процесса измельчения, сказываясь на кратности соударений частиц с лопатками ротора и отбойниками деки и, соответственно, кратности циркуляции материала в рабочей камере.

Анализ зависимости $\mathcal{E} = \mathcal{E}(n)$ (рис. 2б) при заданных значениях D и F показал, что для решет с диаметром отверстий $D = 6$ мм и $D = 8$ мм критерий оптимизации имеет минимум, лежащий в диапазоне варьирования факторов. Для решета с $D = 4$ мм значение критерия оптимизации в диапазоне варьирования факторов снижается с увеличением частоты вращения ротора, его минимальное значение соответствует 3500 мин⁻¹. Тем не менее и для решета с $D = 4$ мм существует минимум за пределами исследуемой области, который определили, предполагая, что полученная модель (1) справедлива и при больших частотах вращения ротора.

Для определения минимальных значений критерия оптимизации функция $\mathcal{E} = \mathcal{E}(n)$ была исследована на экстремум. Точки, в которых удельная энергоёмкость минимальна, определяются формулой:

$$n = \frac{0,0061467 - 0,21985 \cdot D}{0,000001416}. \quad (2)$$

Выводы / Conclusion

Для решет с отверстиями исследуемых диаметров определены следующие оптимальные режимы работы измельчителя:

$D = 4$ мм, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м², $n = 3720$ мин⁻¹ —

$\mathcal{E} = 1,202$ Вт·ч / (кг·ед. ст. изм.);

$D = 6$ мм, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м², $n = 3409$ мин⁻¹ —

$\mathcal{E} = 1,089$ Вт·ч / (кг·ед. ст. изм.);

$D = 8$ мм, $F = 1,458 \cdot 10^{-3}$ м², $n = 3099$ мин⁻¹ —

$\mathcal{E} = 1,173$ Вт·ч / (кг·ед. ст. изм.)

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Материалы подготовлены 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 годы.

FUNDING:

The materials were prepared within the framework of the scientific and technical program 122041300126-6 «Development of promising technical means for intensifying and resource saving post-harvest refinement and processing of feed grain» of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for 2023–2025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сабиев У.К., Пушкарев А.С. Сравнительный анализ устройств для измельчения зерновых материалов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2016; (1): 221–226. <https://elibrary.ru/vvqhpt>
2. Savinyh P., Kazakov V., Moshonkin A., Ivanovs S. Investigations in feeding device of grain crusher. *Engineering for Rural Development. 18th International Scientific Conference*. 2019; 123–128. <http://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N165>
3. Созонтов А.В., Лопатин Л.А. Исследование и оптимизация рабочего процесса дробилки зерна ударного действия. *Вестник НГИЭИ*. 2018; (6): 27–36. <https://elibrary.ru/xszdal>
4. Киприянов Ф.А., Савиных П.А., Копейкин А.Д., Сухляев В.А. Классификация устройств для измельчения фуражного зерна и направления совершенствования конструкций. *АгроЭкоИнфо*. 2022; (5): 33. <https://elibrary.ru/erkdgc>
5. Исупов А.Ю., Иванов И.И., Плотникова Ю.А., Сухопаров А.И. Исследование показателей работы роторно-центробежного измельчителя. *АгроЭкоИнженерия*. 2021; (3): 90–99. <http://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99>
6. Сабиев У.К., Садов В.В. Показатели эффективности измельчителей фуражного зерна. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2021; (6): 93–99. <https://elibrary.ru/bszfpo>

REFERENCES

1. Sabiev U.K., Pushkarev A.S. Comparative analysis devices for crushing grain materials. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016; (1): 221–226 (In Russian). <https://elibrary.ru/vvqhpt>
2. Savinyh P., Kazakov V., Moshonkin A., Ivanovs S. Investigations in feeding device of grain crusher. *Engineering for Rural Development. 18th International Scientific Conference*. 2019; 123–128. <http://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N165>
3. Sozontov A.V., Lopatin L.A. Investigation and optimization of the working process of the crusher grain percussion. *Bulletin NGIEI*. 2018; (6): 27–36 (In Russian). <https://elibrary.ru/xszdal>
4. Kipriyanov F.A., Savinykh P.A., Kopeikin A.D., Sukhlyayev V.A. The classification of devices for reduction in size of forage grain and the directions of construction improvement. *AgroEcolInfo*. 2022; (5): 33 (In Russian). <https://elibrary.ru/erkdgc>
5. Isupov A.Yu., Ivanov I.I., Plotnikova Yu.A., Sukhoparov A.I. Investigation of a grain rotary centrifugal grinder performance. *AgroEcolInzheneriya*. 2021; (3): 90–99 (In Russian). <http://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-90-99>
6. Sabiyev U.K., Sadov V.V. Feeding grain grinder efficiency indices. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021; (6): 93–99 (In Russian). <https://elibrary.ru/bszfpo>

7. Marczuk A., Blicharz-Kania A., Savinykh P.A., Isupov A.Y., 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>

8. Савиных П.А., Исупов А.Ю., Иванов И.И. Результаты исследований центробежно-роторного измельчителя зерна. *Вестник НГИЭИ*. 2019; (8): 18–33. <https://elibrary.ru/qtakupi>

9. Marczuk A., Caban J., Aleshkin A.V., Savinykh P.A., Isupov A.Y., Ivanov I.I. Modeling and Simulation of Particle Motion in the Operation Area of a Centrifugal Rotary Chopper Machine. *Sustainability*. 2019; 11(18): 4873. <https://doi.org/10.3390/su11184873>

10. Асманкин Е.М., Петров А.А., Абдюкаева А.Ф., Наумов Д.В., Федоров А.Н. Пути развития машин для измельчения зерновой массы. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017; (2): 79–81. <https://elibrary.ru/ymxgsb>

11. Сухопаров А.И., Иванов И.И., Плотникова Ю.А. Моделирование движения частицы в рабочей области центробежно-роторного измельчителя. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2019; (4): 240–249. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-14240>

12. Золотарев А.М., Труфанов В.В., Дружинин Р.А., Яровой М.Н. К обоснованию рациональных режимных параметров ударно-центробежной дробилки. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2018; (1): 119–127. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.1.119>

13. Волхонов М.С., Абалихин А.М., Крупин А.В. Анализ эффективности работы нового измельчителя фуражного зерна. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020; (3): 124–131. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-13124>

7. Marczuk A., Blicharz-Kania A., Savinykh P.A., Isupov A.Y., 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>

8. Savinykh P.A., Isupov A.Ju., Ivanov I.I. Results of the research centrifugal-rotary grain crusher. *Bulletin NGIEI*. 2019; (8): 18–33 (In Russian). <https://elibrary.ru/qtakupi>

9. Marczuk A., Caban J., Aleshkin A.V., Savinykh P.A., Isupov A.Y., Ivanov I.I. Modeling and Simulation of Particle Motion in the Operation Area of a Centrifugal Rotary Chopper Machine. *Sustainability*. 2019; 11(18): 4873. <https://doi.org/10.3390/su11184873>

10. Asmankin Ye.M., Petrov A.A., Abdyyukaeva A.F., Naumov D.V., Fyodorov A.N. Ways of improvement the machines for grain mass grinding. *Izvestiya Orenburg State Agrarian University*. 2017; (2): 79–81 (In Russian). <https://elibrary.ru/ymxgsb>

11. Sukhoparov A.I., Ivanov I.I., Plotnikova Yu.A. Modeling the movement of a particle in the workspace of a centrifugal-rotary grinder. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2019; (4): 240–249 (In Russian). <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-14240>

12. Zolotarev A.M., Trufanov V.V., Druzhinin R.A., Yarovy M.N. On the rationale of operating parameters of an impact centrifugal crusher. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018; (1): 119–127 (In Russian). <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.1.119>

13. Volkhonov M.S., Abalikhin A.M., Krupin A.V. Analysis of the efficiency of the new fodder grain grinder. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2020; (3): 124–131 (In Russian). <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-13124>

ОБ АВТОРАХ:

Михаил Станиславович Волхонов,

доктор технических наук, профессор кафедры технической системы в агропромышленном комплексе, Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Учебный городок, д. 34, п. Караваево, Костромской р-н, Костромская обл., 156530, Россия
vms72@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0332-8848>

Антон Михайлович Абалихин,

кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса и механики, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет, ул. Советская, д. 45, Иваново, 153012, Россия
anton-abalikhin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8138-6317>

Дмитрий Владимирович Барабанов,

научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет, ул. Советская, д. 45, Иваново, 153012, Россия
barabanov_dmitry@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2199-8781>

Александр Владимирович Крупин,

кандидат технических наук, доцент кафедры технической системы в агробизнесе, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет, ул. Советская, д. 45, Иваново, 153012, Россия
krupinav37@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0006-1810>

Николай Вячеславович Муханов,

кандидат технических наук, доцент кафедры технической системы в агробизнесе, Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет, ул. Советская, д. 45, Иваново, 153012, Россия
nikem81@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1773-3625>

ABOUT THE AUTHORS:

Mikhail Stanislavovich Volkhonov,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Systems in the agro-industrial complex, Kostroma State Agricultural Academy, 34 Uchebny gorodok, Karavaevo village, Kostroma district, Kostroma region, 156530, Russia
vms72@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0332-8848>

Anton Mikhailovich Abalikhin,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Service and Mechanics, Verkhnevolsk State University of Agronomy and Biotechnology, 45 Sovetskaya str., Ivanovo, 153012, Russia
anton-abalikhin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8138-6317>

Dmitry Vladimirovich Barabanov,

research associate at the research laboratory, Verkhnevolsk State University of Agronomy and Biotechnology, 45 Sovetskaya str., Ivanovo, 153012, Russia
barabanov_dmitry@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2199-8781>

Aleksander Vladimirovich Krupin,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Systems in Agribusiness, Verkhnevolsk State University of Agronomy and Biotechnology, 45 Sovetskaya str., Ivanovo, 153012, Russia
krupinav37@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0006-1810>

Nikolay Vyacheslavovich Muhanov,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Systems in Agribusiness, Verkhnevolsk State University of Agronomy and Biotechnology, 45 Sovetskaya str., Ivanovo, 153012, Russia
nikem81@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1773-3625>