



Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна

А. В. Алешкин¹, С. Ю. Булатов²✉, В. Н. Нечаев²,
С. Л. Низовцев²

¹ Вятский государственный университет
(г. Киров, Российская Федерация)

² Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет
(г. Княгинино, Российская Федерация)

✉ bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Аннотация

Введение. Одним из главных компонентов в рационе сельскохозяйственных животных являются концентрированные корма, которые в России подвергают измельчению молотковыми дробилками. При этом в готовом продукте наблюдается большое содержание пыли, которое можно уменьшить, применяя измельчители с другим принципом измельчения. Предложена конструкция фрезерного измельчителя, в котором разрушение зерна осуществляется резанием.

Цель статьи. Теоретические исследования влияния конструкционных и технологических параметров фрезерного измельчителя на условия движения зерновки по зубу рабочего органа.

Материалы и методы. Теоретическое исследование разработанного измельчителя проводилось с использованием методов усредненного ускорения. Для этого изучалась поверхность зуба рабочего органа.

Результаты исследования. Получены уравнения, описывающие движение частицы по поверхности зуба рабочего органа. Разработана программа, позволяющая облегчить процесс анализа влияния конструкционных и технологических параметров измельчителя на процесс движения частицы по поверхности зуба.

Обсуждение и заключение. Наблюдается прямо пропорциональное уменьшение времени движения частицы по зубу рабочего органа с ростом угловой скорости. В то же время увеличение угла приводит к росту времени нахождения частицы на поверхности зуба. Увеличение значений угловой скорости приводит к снижению перемещения частицы вдоль оси. При угле 45° перемещение вдоль оси в 1,1–1,5 раза меньше, чем при угле 70° . При высоких угловых скоростях перемещение вдоль оси минимально. Из проведенного анализа, учитывая необходимость создания более плавного движения частицы по винтовой линии, следует вывод, что наиболее рациональными будут следующие значения: угол 70° , угловая скорость рабочего органа 185–206 рад/с.

Ключевые слова: концентрированный корм, молотковая дробилка, фрезерный измельчитель, зуб рабочего органа, зерно

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Алешкин А. В., Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Низовцев С. Л., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Обоснование конструкционных и технологических параметров рабочего органа фрезерного измельчителя зерна / А. В. Алешкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 37–51. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

Original article

Substantiation of the Structural and Technological Parameters of the Working Body of the Milling Grain Shredder

A. V. Aleshkin^a, S. Yu. Bulatov^b✉, V. N. Nechaev^b, S. L. Nizovtsev^b

^a Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

^b Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (Knyaginino, Russian Federation)

✉ bulatov_serгей_urevich@mail.ru

Abstract

Introduction. One of the main components in the diet of farm animals is concentrated feed, which in Russia is grinded by shredders. At the same time, in the final product, there is a high dust content, which can be reduced by using grinders with a different principle of grinding. The design of a milling shredder, in which grains are crushed by cutting, is proposed.

Aim of the Article. The article presents theoretical studies of the influence of design and technological parameters of a milling shredder on the conditions of grain motion along the tooth of the working body.

Materials and Methods. The theoretical study of the developed shredder was carried out using averaged acceleration methods. The tooth surface of the working organ was studied.

Results. As a result of theoretical studies, equations describing the motion of a particle along the working body tooth surface were obtained. There has been developed a program to facilitate the process of analyzing the influence of the structural and technological parameters of the shredder on the process of particle motion along the tooth surface.

Discussion and Conclusion. There is a directly proportional decrease in the time of motion of the particle along the working body tooth surface with increasing the angular velocity. At the same time, increasing the angle leads to the increase of the time of the particle along the tooth surface. The increase of angular velocity values leads to decreasing particle displacement along the axis. At the angle of 45° displacement along the axis is 1.1–1.5 times less than at an angle of 70°. At high angular velocities, the moving along the axis is minimal. The analysis, given the need to create a smoother motion of the particle along the helical line, shows that the most rational will be the following values: angle 70° and angular velocity of the working body 185–206 rad/s.

Keywords: concentrated feed, shredder, milling shredder, tooth of the working body, grain

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Aleshkin A.V., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovtsev S.L. Substantiation of the Structural and Technological Parameters of the Working Body of the Milling Grain Shredder. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):37–51. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.037-051>

Введение

В современных условиях на первое место выходит продовольственная безопасность страны. Во многом она зависит от состояния отраслей животноводства и растениеводства. Общеизвестно, что продуктивный потенциал животных и птицы во многом определяется их рационом¹ [1–3]. Одним из главных компонентов рационов сельскохозяйственных животных являются концентрированные корма² [4]. Результаты исследований зарубежных ученых показывают важность использования зерновых в рационах животных, указывая на благоприятный процесс, протекающий в желудке животных при кормлении концентрированными кормами [5–8]. Особую роль среди злаковых отдают ячменю в силу его высокого содержания белка, что важно при кормлении высокопродуктивных животных³ [9; 10]. Установлено, что крупный рогатый скот (КРС) неспособен пережевывать и переваривать зерно в цельном виде [11]. Поэтому его сначала перерабатывают, подвергая разрушению ударом, раздавливанием, разрезанием и т. д.⁴ В США, Австралии и странах ЕС принято зерно подвергать паровой обработке, чтобы повысить его влажность, так как при переработке влажного зерна выделяется меньше пыли⁵ [12–16]. В российских сельскохозяйственных организациях для

разрушения зерна наиболее часто применяют молотковые дробилки с реализованным в них прямым ударом [14–18]. В данном способе есть такие преимущества, как простота исполнения машины, относительно высокая производительность. Однако самым большим недостатком является пылевидная фракция в измельченном зерне [19]. Пыль оказывает негативное влияние на здоровье сельскохозяйственных животных и особенно птицу. Некоторые молотковые дробилки неспособны провести подготовку зерна для кормления птицы таким образом, чтобы оно соответствовало требованиям ГОСТа [20]. В плане равномерности измельчения зерна и малого содержания пылевидной фракции в готовом продукте в более выигрышном положении перед молотковыми дробилками стоят измельчители, в которых реализованы скалывающий и режущий тип разрушения [21]. Предложена конструкция фрезерного измельчителя, в котором разрушение зерна осуществляется резанием [22]. На данном этапе необходимо провести оценку конструкционных и технологических параметров измельчителя.

Цель работы – теоретические исследования влияния конструкционных и технологических параметров фрезерного измельчителя на условия движения зерновки по зубу рабочего органа.

¹ Feed Uses for Barley / J. L. Black [et al.] // Proceedings of the 12th Australian Barley Technical Symposium. Hobart, 2005. URL: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/2648> (дата обращения: 03.12.2022).

² National Research Council: Nutrient Requirements of Beef Cattle. 7th ed. Washington, D.C. : National Academy Press, 2000. URL: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/9791/nutrient-requirements-of-beef-cattle-seventh-revised-edition-update-2000> (дата обращения: 03.12.2022) ; Nikkhah A. Barley Grain for Rumen and Ruminants: Over-Modernized Uses of an Inimitable Fuel // Barley: Production, Cultivation and Uses. Nova Science Publishers, Inc, 2011. P. 247–258. URL: https://www.researchgate.net/publication/285956756_Barley_grain_for_rumen_and_ruminants_Over-modernized_uses_of_an_inimitable_fuel (дата обращения: 03.12.2022).

³ National Research Council...

⁴ Nikkhah A. Barley Grain for Rumen and Ruminants...

⁵ Anderson V., Schroeder J. W. Feeding Barley to Dairy Cattle. Fargo : North Dakota State University Extension Service, 2010. 8 p. URL: https://library.ndsu.edu/ir/bitstream/handle/10365/9318/eb72_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 03.12.2022).

Обзор литературы

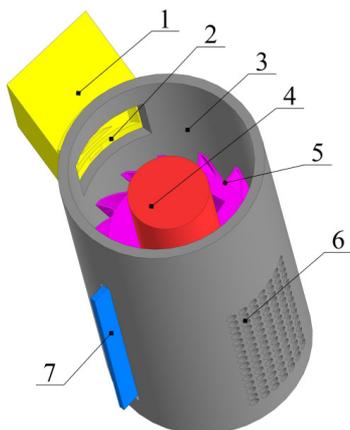
В настоящее время измельчению зерна уделяется большое внимание, и процесс этот достаточно полно изучен [23–26]. Теоретические исследования направлены на изучение степени загрузки дробилки и скоростных характеристик рабочих органов [23; 24]. Интерес представляют теоретические исследования по изучению взаимодействия зерна с рабочими органами и его движения в камере измельчения, так как они лежат в основе проектирования дробилок [27–31]. Современные экспериментальные исследования направлены на определение оптимальных конструкционных и технологических параметров дробилок, проверку теоретических выкладок. В основном изучается влияние конструкционных и режимных параметров дробилок на энергетические показатели [32–35]. Интерес ученых вызывают динамическая устойчивость разрабатываемых дробилок [36; 37]. Часть исследователей уделяют внимание повышению производительности дробилок зерна путем установки различных сепарационных элементов [38]. Большая часть научных работ направлена на изучение традиционных, широко распространенных в России молотковых дробилок с реализованным в них прямым ударом молотка по зерновке. Измельчители зерна, в которых используется скалывание и разрезание, в России не получили такого широкого распространения, как молотковые дробилки. Однако такие устройства обладают существенным преимуществом перед молотковыми – более низкие удельные энергозатраты. О. В. Нанка в своей работе показал, что удельные энергозатраты на измельчение зерна в молотковых дробилках составляют 15–18 кВт·ч/т в то время, как в дисковых измельчителях 8,5–12 кВт·ч/т, а в центробежных 4,5–6,5 кВт·ч/т [39].

Исследователи из Вологодской государственной молочнохозяйственной академии отмечают перспективность применения резания зерновки, выделяя кроме невысоких энергозатрат и такое преимущество способа, как получение готового продукта заданного гранулометрического состава [21]. При этом многочисленными исследованиями рекомендуется применять ножи с малыми углами заточки. Однако В. И. Сыроватка, исследовав процесс динамического резания, рекомендует применять ножи с большим углом заточки (80–85°), отмечая их более высокий ресурс, чем у ножей с малыми углами [40].

Таким образом, очевидны преимущества разрушения зерновок их разрезанием: низкие удельные энергозатраты, выровненный гранулометрический состав.

Материалы и методы

Теоретические исследования проводились для фрезерного измельчителя, трехмерная модель которого представлена на рисунке 1. Устройство представляет собой полый цилиндр, внутри которого на валу 4 вращается рабочий орган (фреза) 5. Через загрузочную горловину 1 и загрузочное окно 2 зерно подается к рабочему органу. Далее зерно по винтовой поверхности зуба фрезы перемещается вниз до момента соприкосновения с противорезом 7. Под действием режущего усилия со стороны зуба фрезы и противореза зерновка разрезается. Также разрезание зерновок осуществляется в области выгрузного окна 6, когда они попадают в отверстия решета, зажимаются и разрезаются зубом фрезы. Разрушенные зерновки выводятся из зоны измельчения через зазор между противорезом и корпусом, а также через отверстия решета. Подробное описание устройства и его работы представлено в другой работе [41].

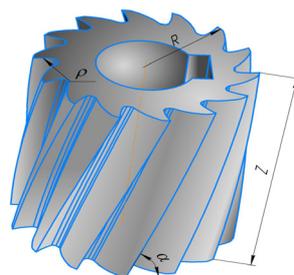


Р и с. 1. Трехмерная модель фрезерного измельчителя зерна: 1 – загрузочная горловина; 2 – загрузочное окно; 3 – цилиндрический корпус; 4 – вал рабочего органа; 5 – рабочий орган; 6 – выгрузное окно с решетом; 7 – противорез

F i g. 1. Three-dimensional model of a milling grain shredder: 1 – loading neck; 2 – loading window; 3 – cylindrical body; 4 – shaft of the working body; 5 – working body; 6 – unloading window with a sieve; 7 – counter-cut

При исследовании рабочего процесса измельчителя важным является изучение условий движения зерновки по поверхности зуба в зависимости от конструктивных и технологических параметров измельчителя. Это позволит не только рассмотреть траекторию движения зерновки и определить наиболее рациональные значения исследуемых параметров, но и создать базу для дальнейших расчетов по определению пропускной способности измельчителя. Теоретическое исследование разработанного измельчителя проводилось с использованием методов усредненного ускорения. Для этого изучалась поверхность зуба рабочего органа (фрезы), трехмерное изображение которой представлено на рисунке 2. На виде сверху она представляет собой дугу радиусом ρ . Между горизонтальной плоскостью и кромкой зуба, представляющей собой винтовую линию, расположенную на боковой поверхности цилиндра, в развертке образован угол α (рис. 2 и 4).

Agricultural engineering



Р и с. 2. Трехмерная модель рабочего органа фрезерного измельчителя зерна

F i g. 2. Three-dimensional model of the working body of a milling grain shredder

Введем оси координат: x_1, y_1, z_1 – связаны жестко с рабочим органом; x_2, y_2, z_2 – поворачивающиеся вокруг и передвигающиеся вдоль оси z_1 . При этом уравнение, описывающее линию контура зуба по осям x_2, y_2, z_2 , неизменно.

Уравнение, описывающее окружность в координатах x_2, y_2 , которые совпадают с координатами x_1, y_1 лишь в начальном сечении ($z_1 = 0$), имеет вид:

$$(x_2 - a)^2 + (y_2 - b)^2 - \rho^2 = 0, \quad (1)$$

где ρ – радиус дуги окружности; a, b – смещение центра дуги окружности относительно начала координат соответственно по осям x_2 и y_2 .

Вогнутая поверхность зуба описывается уравнением полуокружности:

$$y_2 = b - \sqrt{\rho^2 - (x_2 - a)^2}. \quad (2)$$

Оси x_1, y_1, z_1 связаны с рабочим органом, а x_2, y_2, z_2 поворачиваются вокруг z_1 на угол φ , который можно выразить через координату z_1 :

$$\varphi = kz_1, \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от величины угла $\alpha = \text{const}$ и радиуса рабочего органа.

Коэффициент пропорциональности k вычисляется по выражению:

$$k = \frac{1}{R \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}. \quad (4)$$

Изменение координаты z_1 ведет к перемещению осей x_2, y_2, z_2 вдоль нее. Также оси x_2, y_2, z_2 поворачиваются вокруг z_1 таким образом, что дуга, выражаемая уравнением (2), описывает винтовую поверхность в неподвижных координатах x_1, y_1, z_1 :

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \cos(\varphi) - y_2 \sin(\varphi) \\ y_1 = x_2 \sin(\varphi) + y_2 \cos(\varphi) \end{cases} \quad (5)$$

Выразим x_2, y_2 через координаты x_1, y_1, z_1 . Тогда получим:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos(kz_1) + y_1 \sin(kz_1) \\ y_2 = -x_1 \sin(kz_1) + y_1 \cos(kz_1) \end{cases} \quad (6)$$

Подставим систему уравнений (6) в выражение (1). Получим уравнение связи между координатами винтовой поверхности с поперечным сечением в виде дуги окружности:

$$f(x_1, y_1, z_1) = (x_1 \cos(kz_1) + y_1 \sin(kz_1) - a)^2 + (-x_1 \sin(kz_1) + y_1 \cos(kz_1) - b)^2 - \rho^2 = 0. \quad (7)$$

На рисунке 3 представлен фрагмент теоретической поверхности, которая построена по выражению (6). По сути это поверхность рассматриваемого зуба

рабочего органа измельчителя, которая построена при известных параметрах ρ и α .

Результаты исследования

Рассмотрим движение частицы по построенной поверхности. Известно, что рабочий орган измельчителя совершает вращательное движение вокруг оси z_1 с угловой скоростью $\bar{\omega}$. В относительном движении частицы по вращающейся построенной поверхности на нее оказывают действие силы тяжести $m\bar{g}$, нормальной реакции \bar{N} , трения $\bar{F}_{\text{тр}}$, инерции Кориолиса $\bar{\Phi}_c$ и переносная центробежная сила инерции $\bar{\Phi}_e$ (рис. 4).

Движение частицы описывается дифференциальным уравнением:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m\bar{g} + \bar{N} + \bar{F}_{\text{тр}} + \bar{\Phi}_e + \bar{\Phi}_c. \quad (8)$$

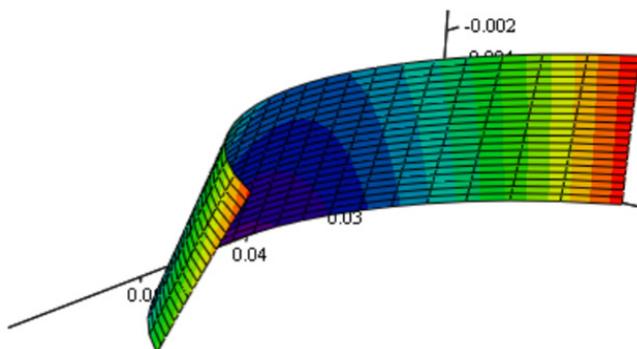
Сила тяжести, действующая на частицу массой m , имеет проекции:

$$m\bar{g} = m\bar{g}(0, 0, -mg),$$

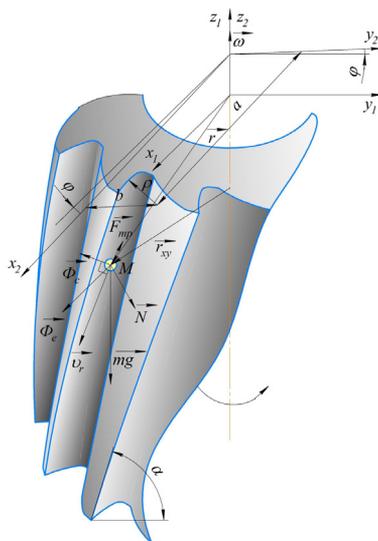
где \bar{g} – ускорение свободного падения.

Нормальная реакция, действующая на частицу со стороны поверхности, в соответствии с уравнениями Лагранжа первого рода в рассматриваемом случае примет вид:

$$\bar{N} = \lambda \cdot \operatorname{grad}(f),$$



Р и с. 3. Расчетная поверхность зуба рабочего органа фрезерного измельчителя
F i g. 3. Calculated tooth surface of the working body of the milling shredder



Р и с. 4. Схема действия сил, влияющих на движение зерновки по зубу рабочего органа фрезерного измельчителя

F i g. 4. Diagram of the forces affecting the movement of the grain along the tooth of the working body of the milling shredder

где λ – неопределенный множитель Лагранжа; $grad(f)$ – вектор-градиент к поверхности по уравнению (7).

Сила трения запишется через закон Кулона:

$$\vec{F}_{\text{тр}} \leq -\mu \left| \vec{N} \right| \frac{\vec{v}_r}{|\vec{v}_r|} = -\mu \left| \lambda \cdot grad(f) \right| \frac{\vec{v}_r}{|\vec{v}_r|}, \quad (9)$$

где μ – коэффициент сухого трения скольжения; \vec{v}_r – относительная скорость частицы.

Модуль относительной скорости рассчитывается по формуле:

$$|\vec{v}_r| = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2}. \quad (10)$$

Переносная центробежная сила инерции $\vec{\Phi}_c$ равна:

$$\vec{\Phi}_c = m\omega^2 \vec{r}_{xy}, \quad (11)$$

где $\vec{r}_{xy} = \vec{r}_{xy}(x_1, y_1, 0)$ – проекция радиус-вектора частицы \vec{r} в относительном движении на плоскость (x_1, y_1) .

Сила инерции Кориолиса $\vec{\Phi}_c$ равна:

$$\vec{\Phi}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}_r,$$

$$\vec{\Phi}_c = -2m \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & \omega \\ \dot{x}_1 & \dot{y}_1 & \dot{z}_1 \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы осей x_1, y_1, z_1 соответственно.

Подставим все силы в правую часть выражения (8) и разделим на массу частицы m . Спроецируем полученное выражение на оси координат. Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{\lambda}{m} \frac{\partial f}{\partial x_1} - \mu \left| \frac{\lambda}{m} \cdot grad(f) \right| \frac{\dot{x}_1}{|\vec{v}_r|} + \omega^2 x_1 + 2\omega \dot{y}_1 \\ \ddot{y}_1 = \frac{\lambda}{m} \frac{\partial f}{\partial y_1} - \mu \left| \frac{\lambda}{m} \cdot grad(f) \right| \frac{\dot{y}_1}{|\vec{v}_r|} + \omega^2 y_1 - 2\omega \dot{x}_1 \\ \ddot{z}_1 = -g + \frac{\lambda}{m} \frac{\partial f}{\partial z_1} - \mu \left| \frac{\lambda}{m} \cdot grad(f) \right| \frac{\dot{z}_1}{|\vec{v}_r|}. \end{cases} \quad (13)$$

Уравнением связи (7) замыкаем систему уравнений (13). Решение полученной системы уравнений (13) совместно с (7) проводили численно методом усредненного ускорения, задаваясь пятью итерациями на каждом шаге интегрирования.

Проекции абсолютной скорости на вращающиеся оси вычисляются после определения относительных по выражениям:

$$\begin{cases} v_{ax} = \dot{x}_1 - \omega y_1 \\ v_{ay} = \dot{y}_1 + \omega x_1 \\ v_{az} = \dot{z}_1. \end{cases} \quad (14)$$

В среде MSVisualStudio на языке C# составлена программа для расчета искомых параметров в соответствии с изложенным алгоритмом.

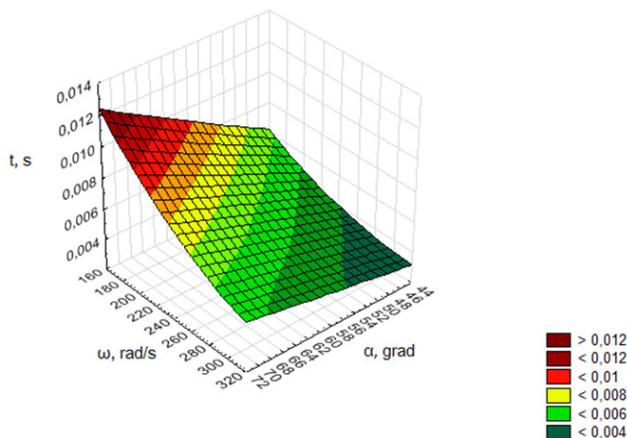
Был проведен анализ движения зерновки в разработанной программе. При расчете принимались следующие значения: минимальная угловая скорость рабочего органа $\omega_{\min} = 185 \text{ c}^{-1}$ (минимальное критическое значение, при котором реализуется работа измельчителя и не происходит его остановки вследствие

забивания зерном), максимальная угловая скорость рабочего органа $\omega_{\max} = 311 \text{ c}^{-1}$ (соответствует максимальной частоте вращения вала электродвигателя 2 970 мин⁻¹), минимальное и максимальное значение углов наклона зуба $\alpha_{\min} = 45^\circ$ и $\alpha_{\max} = 90^\circ$. Изменение значений угла α обусловлено условиями производства фрез. В результате расчетов построены графики (рис. 5 и 6).

Обсуждение и заключение

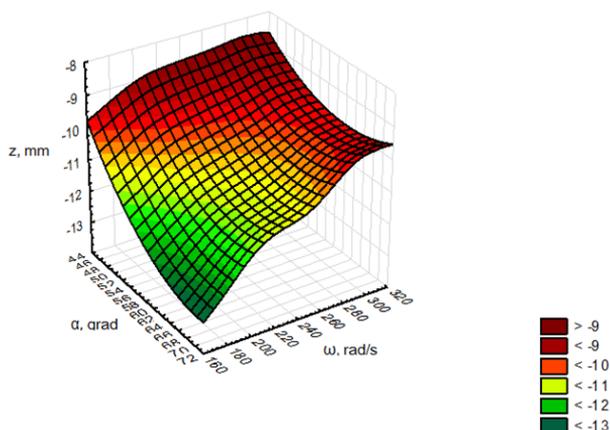
Анализ графиков, представленных на рисунке 5, показывает прямо пропорциональное уменьшение времени движения частицы по зубу рабочего органа с ростом угловой скорости. В то же время увеличение угла α приводит к росту времени нахождения частицы на поверхности зуба. В исследуемом диапазоне оно возрастает в 1,7 раза.

Увеличение значений угловой скорости приводит к снижению перемещения частицы вдоль оси z (рис. 6). При $\omega_{\min} = 185 \text{ рад/с}$ z находится в диапазоне 9,5–12,5 мм в зависимости от угла α , а при $\omega_{\max} = 311 \text{ рад/с}$ – 8,5–10,5 мм. При $\alpha = 45^\circ$ перемещение вдоль оси z в 1,1–1,5 раза меньше, чем при $\alpha = 70^\circ$.



Р и с. 5. Изменение времени движения зерновки по зубу в зависимости от угла его наклона и угловой скорости рабочего органа фрезерного измельчителя

F i g. 5. Change in the time of movement of the grain along the tooth depending on the angle of its inclination and the angular velocity of the working body of the milling shredder



Р и с. 6. Изменение величины перемещения зерновки вдоль оси z в зависимости от угла наклона зуба и угловой скорости рабочего органа фрезерного измельчителя

Fig. 6. Change in the amount of grain movement along the z axis depending on the angle of inclination of the tooth and the angular velocity of the working body of the milling shredder

При высоких угловых скоростях перемещение вдоль оси z минимально. Это свидетельствует о том, что частица быстро достигает корпуса измельчителя и далее движется по траектории, близкой к окружности. Малые углы, независимо от угловой скорости, способствуют быстрому перемещению частицы в низ корпуса, что создает неблагоприятные условия проходу частицы сквозь решето. Из проведенного анализа, учитывая

необходимость создания такого движения частицы, при котором она будет как можно дольше двигаться по поверхности решета по винтовой линии, следует вывод, что наиболее рациональными будут следующие значения: $\alpha = 70^\circ$, $\omega = 185\text{--}206$ рад/с. Результаты проведенных исследований послужат базой для дальнейших расчетов, направленных на определение производительности измельчителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikkhah A. Barley Grain for Ruminants: a Global Treasure or Tragedy // Journal of Animal Science and Biotechnology. 2012. Vol. 3, Issue 1. doi:<https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-22>
2. Nikkhah A. Optimizing Barley Grain Use by Dairy Cows: A Betterment of Current Perceptions // Progress in Food Science and Technology. 2011. Vol. 1. P. 165–178.
3. Processing Oats Grain for Cull Cows Finished in Feedlot Processamento Do Grão De Aveia Para Alimentação De Vacas De Descarte Terminadas Em Confinamento / J. Restle [et al.] // Ciência Animal Brasileira. 2009. Vol. 10, Issue 2. P. 497–503. URL: <https://doaj.org/article/018feb12ab5748b58e26ba8508289daa> (дата обращения: 03.12.2022).
4. Nikkhah A. Postmodern Management of Starchy Grains for Ruminants: a Barley Grain Perspective // Russian Agricultural Sciences. 2012. Vol. 38. P. 14–21. doi: <https://doi.org/10.3103/S106836741201017X>
5. Effect of Grains Differing in Expected Ruminant Fermentability on the Productivity of Lactating Dairy / C. Silveira [et al.] // Journal of Dairy Science. 2007. Vol. 90. P. 2852–2859. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2006-649>
6. Lehmann M., Meeske R. Substituting Maize Grain with Barley Grain in Concentrates Fed to Jersey Cows Grazing Kikuyu-Ryegrass Pasture // South Afr J Anim Sci. 2006. Vol. 36, Issue 3. P. 175–180.

7. Mixtures of Wheat and High-Moisture Corn in Finishing Diets: Feedlot Performance and in Situ Rate of Starch Digestion in Steers / B. J. Bock [et al.] // *Journal of Animal Science*. 1991. Vol. 69, Issue 7. P. 2703–2710. doi: <https://doi.org/10.2527/1991.6972703x>

8. Feeding Combinations of Dry Corn and Wheat to Finishing Lambs and Cattle / R. Kreikemeier [et al.] // *Journal of Animal Science*. 1987. Vol. 65. P. 1647–1654. doi: <https://doi.org/10.2527/jas1987.6561647x>

9. Boss D. L., Bowman J. G. Barley Varieties for Finishing Steers: I. Feedlot Performance, in Vivo Diet Digestion, and Carcass Characteristics // *Journal of Animal Science*. 1996. Vol. 74, Issue 6. P. 1967–1972. doi: <https://doi.org/10.2527/1996.7481967x>

10. Van Barneveld R. J. Chemical and Physical Characteristics of Grains Related to Variability in Energy and Amino Acid Availability in Pigs: A Review // *Australian Journal of Agricultural Research*. 1999. Vol. 50, Issue 5. P. 667–687. URL: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/1975> (дата обращения: 03.12.2022).

11. Valentine S. C., Wickes R. B. The Production and Composition of Milk from Dairy Cows Fed Hay Supplemented with Whole, Rolled or Alkali Treated Barley Grain // *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*. 1980. Vol. 13. P. 397–400. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19820475140> (дата обращения: 03.12.2022).

12. Yang W. Z., Beauchemin K. A., Rode L. M. Effects of Barley Grain Processing on Extent of Digestion and Milk Production of Lactating Cows // *Journal of Dairy Science*. 2000. Vol. 83, Issue 3. P. 554–568. doi: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74915-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74915-0)

13. Zinn R. A. Influence of Processing on the Comparative Feeding Value of Barley for Feedlot Cattle // *Journal of Animal Science*. 1993. Vol. 71, Issue 1. P. 3–10. doi: <https://doi.org/10.2527/1993.7113>

14. Modal Analysis and Acoustic Noise Characterization of a Grain Crusher / W. Tanaś [et al.] // *Ann Agric Environ Med*. 2018. Vol. 25, Issue 3. P. 433–436. doi: <https://doi.org/10.26444/aaem/87154>

15. Яровой М. Н. Молотковая дробилка для фуражного зерна с конусным сепаратором // *Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции*. 2021. № 2. С. 97–101. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47620637> (дата обращения: 03.12.2022).

16. Обоснование конструкции молотковой дробилки с возможностью регулирования параметров искусственно создаваемой рабочей атмосферы / Ф. А. Киприянов [и др.] // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2021. № 4. С. 76–82. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/316553> (дата обращения: 03.12.2022).

17. Исакаев Р. М., Исенов С. С., Заичко Г. А. Системный анализ ударно-раскалывающего измельчения в молотковой дробилке // *Труды университета*. 2021. № 3. С. 54–60. doi: https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_3_54

18. Nitrogening Hammers of the Grain Crusher of the Aknar Poultry Factory / V. S. Portnov [et al.] // *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021. Vol. 1, Issue 1. P. 9–13. doi: https://doi.org/10.52209/2706-977X_2021_1_9

19. Ширококов В. И., Федоров О. С., Ипатов А. Г. Анализ качества измельченного зерна при использовании дробилок открытого и закрытого типов // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 2. С. 69–74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41207668> (дата обращения: 03.12.2022).

20. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Шамин А. Е. Результаты оценки качества измельчения зерновых дробилкой ДЗМ-6 // *Вестник НГИЭИ*. 2020. № 3. С. 21–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42593981> (дата обращения: 03.12.2022).

21. Острцов В. Н., Сухляев В. А. Исследование энергосберегающего метода разрушения зерна // *Молочнохозяйственный вестник*. 2013. № 1. С. 29–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19427901> (дата обращения: 03.12.2022).

22. Фрезерный измельчитель зерна / А. Г. Сергеев [и др.] // *Сельский механизатор*. 2022. № 5. С. 14–15. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48700167> (дата обращения: 03.12.2022).

23. Садов В. В., Сорокин С. А. Повышение эффективности измельчения зерновых компонентов за счет оптимальной загрузки молотковой дробилки // *Вестник Алтайского государственного*

аграрного университета. 2021. № 3. С. 100–106. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45155254> (дата обращения: 03.12.2022).

24. Прейс В. В., Журавлев А. А. Обоснование рационального скоростного режима работы молотковой дробилки по критерию удельной энергоёмкости процесса измельчения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 6. С. 23–28. URL: <https://clck.ru/33VD8q> (дата обращения: 03.12.2022).

25. Ben-Nun O., Einav I. The Role of Self-Organization during Confined Comminution of Granular Materials // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2010. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0205>

26. Kurbonov N., Kholdarova G. Researches on Work Quality Indicators of Grain Grinder-Crusher for Farmers // Universum: технические науки. 2022. № 7. С. 25–27. URL: <https://clck.ru/33U58G> (дата обращения: 03.12.2022).

27. Керженцев В. А., Перова Н. В. Математическое моделирование процесса измельчения сыпучего продукта по структурным составляющим молотковой дробилки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2022. Т. 9, № 1–2. С. 54–61. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417911> (дата обращения: 03.12.2022).

28. Яровой М. Н., Дружинин Р. А., Корнев А. С. Теоретические основы определения энергии перемещения кольцевого слоя в молотковой дробилке // АгроЭкоИнфо. 2022. № 2. doi: <https://doi.org/10.51419/202122222>

29. Керженцев В. А., Перова Н. В. Особенности структуры молотковой дробилки, определяемые по моделирующим функциям процесса измельчения пищевых смесей // Актуальные проблемы в машиностроении. 2022. Т. 9, № 1–2. С. 38–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417909> (дата обращения: 03.12.2022).

30. Бесподенов Р. В. Анализ работы молотковых дробилок на основании теории размерности // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 2. С. 42–46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48089638> (дата обращения: 03.12.2022).

31. Бесподенов Р. В. Диссипация энергии в конструктивных элементах молотковой зернодробилки // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 73–77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46467211> (дата обращения: 03.12.2022).

32. О выборе рациональных параметров молотковой дробилки с монолитным молотком / М. Б. Балданов [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 1. С. 55–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42622809> (дата обращения: 03.12.2022).

33. Яровой М. Н., Корнев А. С., Дружинин Р. А. Влияние окружной скорости молотков и диаметра рабочей камеры на величину эффективной мощности молотковой дробилки // АгроЭкоИнфо. 2022. № 2. doi: <https://doi.org/10.51419/202122235>

34. Чехунов О. А., Воронин В. В., Ворохобин А. В. Определение основных конструктивно-режимных параметров молотковой зернодробилки для фуражного зерна // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 2. С. 45–56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46334381> (дата обращения: 03.12.2022).

35. Вендин С. В., Саенко Ю. В., Семернина М. А. Дробилка для зерна с комбинированной дробильной камерой // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 1. С. 27–39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45684596> (дата обращения: 03.12.2022).

36. Федоренко И. Я. Колебания и динамическая устойчивость молотков зернодробилок // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 4. С. 98–107. doi: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-210-4-98-107>

37. Федоренко И. Я. Динамические свойства молотковой зернодробилки с вертикальным расположением барабана // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 89–95. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44908773> (дата обращения: 03.12.2022).

38. Повышение производительности дробилки зерна за счет улучшения сепарации / А. А. Петров [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 3. С. 159–162. doi: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162>

39. Нанка О. В. Способы механического воздействия при измельчении фуражного зерна и их энергетическая оценка // Агротехника и энергообеспечение. 2014. № 1. С. 204–209. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22751524> (дата обращения: 03.12.2022).

40. Сыроватка В. И., Сергеев Н. С. Исследование процесса динамического резания семян рапса и фуражного зерна // Вестник «МГАУ». 2008. № 1. С. 54–59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10365958> (дата обращения: 03.12.2022).

41. Измельчитель сыпучих продуктов : патент 2737143 Российская Федерация / Миронов К. Е., Низовцев С. Л. № 2020108480 ; заявл. 26.02.2020 ; опубл. 25.11.2020. 4 с.

Поступила 06.12.2022; одобрена после рецензирования 26.12.2022; принята к публикации 29.12.2022

Об авторах:

Алешкин Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480>, Researcher ID: ABA-6228-2020, Scopus ID: 57190028500, usr00008@vyatsu.ru

Булатов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, Researcher ID: ABC-3577-2020, bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Нечаев Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технических и биологических систем Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>, Researcher ID: ABC-4742-2021, nechaev-v@list.ru

Низовцев Сергей Леонидович, доктор технических наук, аспирант Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а), 9910250@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. В. Алешкин – разработка теоретических предпосылок, написание программы.

С. Ю. Булатов – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, осуществление критического анализа и доработка текста.

В. Н. Нечаев – подготовка начального варианта статьи, оформление графического материала, анализ полученных результатов.

С. Л. Низовцев – формулирование цели исследований, проведение обзора литературных источников.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Nikkhah A. Barley Grain for Ruminants: a Global Treasure or Tragedy. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2012;3(1). doi:<https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-22>

2. Nikkhah A. Optimizing Barley Grain Use by Dairy Cows: A Betterment of Current Perceptions. *Progress in Food Science and Technology*. 2011;1:165–178.

3. Restle J., Faturi C., Pascoal L.L., et al. Processing Oats Grain for Cull Cows Finished in Feedlot Processamento Do Grão De Aveia Para Alimentação De Vacas De Descarte Terminadas Em Confinamento. *Ciência Animal Brasileira*. 2009;10(2):497–503. Available at: <https://doaj.org/article/018feb12ab5748b58e26ba8508289daa> (accessed 03.12.2022).

4. Nikkhah A. Postmodern Management of Starchy Grains for Ruminants: a Barley Grain Perspective. *Russian Agricultural Sciences*. 2012;38:14–21. doi: <https://doi.org/10.3103/S106836741201017X>

5. Silveira C., Oba M., Beauchemin K.A., Helm J. Effect of Grains Differing in Expected Ruminant Fermentability on the Productivity of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2007;90:2852–2859. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2006-649>
6. Lehmann M., Meeske R. Substituting Maize Grain with Barley Grain in Concentrates Fed to Jersey Cows Grazing Kikuyu-Ryegrass Pasture. *South Afr J Anim Sci*. 2006;36(3):175–180.
7. Bock B.J., Brandt R.T., Harmon D.L., et al. Mixtures of Wheat and High-Moisture Corn in Finishing Diets: Feedlot Performance and in Situ Rate of Starch Digestion in Steers. *Journal of Animal Science*. 1991;69(7):2703–2710. doi: <https://doi.org/10.2527/1991.6972703x>
8. Kreikemeier R., Stock R.A., Brink D.R., Britton R.A. Feeding Combinations of Dry Corn and Wheat to Finishing Lambs and Cattle. *Journal of Animal Science*. 1987;65:1647–1654. doi: <https://doi.org/10.2527/jas1987.6561647x>
9. Boss D.L., Bowman J.G. Barley Varieties for Finishing Steers: I. Feedlot Performance, in Vivo Diet Digestion, and Carcass Characteristics. *Journal of Animal Science*. 1996;74(6):1967–1972. doi: <https://doi.org/10.2527/1996.7481967x>
10. Van Barneveld R.J. Chemical and Physical Characteristics of Grains Related to Variability in Energy and Amino Acid Availability in Pigs: A review. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1999;50(5):667–687. Available at: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/1975> (accessed 03.12.2022).
11. Valentine S.C., Wickes R.B. The Production and Composition of Milk from Dairy Cows Fed Hay Supplemented with Whole, Rolled or Alkali Treated Barley Grain. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*. 1980;13:397–400. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19820475140> (accessed 03.12.2022).
12. Yang W.Z., Beauchemin K.A., Rode L.M. Effects of Barley Grain Processing on Extent of Digestion and Milk Production of Lactating Cows. *Journal of Dairy Science*. 2000;83(3):554–568. doi: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74915-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74915-0)
13. Zinn R.A. Influence of Processing on the Comparative Feeding Value of Barley for Feedlot Cattle. *Journal of Animal Science*. 1993;71(1):3–10. doi: <https://doi.org/10.2527/1993.7113>
14. Tanaś W., Szczepaniak J., Kromulski J., et al. Modal Analysis and Acoustic Noise Characterization of a Grain Crusher. *Ann Agric Environ Med*. 2018;25(3):433–436. doi: <https://doi.org/10.26444/aaem/87154>
15. Yarovoj M.N. Hammer Crusher for Feed Grain with Cone Separator. *Tekhnologii i tovarovedenie sel'skokhozyaystvennoy produkcii*. 2021;(2):97–101. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47620637> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Kipriyanov F.A., Palitsyn A.V., Sukhlyayev V.A., Belozherov S.A. [Rationale for the Design of a Hammer Crusher with the Ability to Regulate the Parameters of the Artificially Created Working Atmosphere]. *Vestnik APK Verkhnevolzhya*. 2021;(4):76–82. Available at: <https://e.lanbook.com/journal/issue/316553> (accessed 03.12.2022). (In Russ.)
17. Iskakov R.M., Isenov S.S., Zaichko G.A. System Analysis of Impact-Splitting Grinding in a Hammer Mill. *Trudy universiteta*. 2021;(3):54–60. (In Russ., abstract in Eng.) doi: https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_3_54
18. Portnov V.S., Yurov V.M., Makhanov K.M., et al. Nitrogening Hammers of the Grain Crusher of the Aknar Poultry Factory. *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021;1(1):9–13. doi: https://doi.org/10.52209/2706-977X_2021_1_9
19. Shirobokov V.I., Fyodorov O.S., Ipatov A.G. Analysis of Crushed Grain Quality When Using Crushers of Open and Closed Types. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2019;(2):69–74. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41207668> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Shamin A.E. Results of Evaluation of the Quality of Grain Crushing by the DZM-6 Crusher. *Vestnik NGIEI*. 2020;(3):21–36. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42593981> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Ostretsov V.N., Sukhlyayev V.A. Seed Cleaving Energy-Saving Method Research. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*. 2013;(1):29–36. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19427901> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

22. Sergeev A.G., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Nizovcev S.L. Milling Grain Shredder. *Selskiy mekhanizator*. 2022;(5):14–15. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48700167> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
23. Sadov V.V., Sorokin S.A. Increasing the Grinding Efficiency of Grain Components by Optimal Loading of the Hammer Crusher. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(3):100–106. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45155254> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Preys V.V., Zhuravlev A.A. Rationale High-Speed Mode of Operation of the Hammer Crusher According to the Criterion of the Energy Intensity of the Grinding Process. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020;(6):23–28. Available at: <https://elck.ru/33VD8q> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Ben-Nun O., Einav I. The Role of Self-Organization during Confined Comminution of Granular Materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2010. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0205>
26. Kurbonov N., Kholdarova G. Researches on Work Quality Indicators of Grain Grinder-Crusher for Farmers. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022;(7):25–27. Available at: <https://elck.ru/33U58G> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
27. Kerzhentsev V.A., Perova N.V. Mathematical Modeling of the Process Grinding of Bulk Food Product on Structural Components of a Hammer Crusher. *Aktualnye problemy v mashinostroenii*. 2022;9(1–2):54–61. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417911> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
28. Yarovoy M.N., Druzhinin R.A., Kornev A.S. [Theoretical Basis for Determining the Displacement Energy of an Annular Layer in a Hammer Crusher]. *AgroEkoInfo*. 2022;(2). (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.51419/202122222>
29. Kerzhentsev V.A., Perova N.V. Structural Features of Hammer Crusher, Determined by Modeling Functions of Food Grinding Processes. *Actual Problems in Machine Building*. 2022;9(1–2):38–46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48417909> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
30. Bospoldenov R.V. Analysis of Hammer Crusher Operation Based on the Dimension Theory. *Vestnik molodezhnoy nauki Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(2):42–46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48089638> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
31. Bospoldenov R.V. Energy Dissipation in Structural Elements of a Hammer Grain Crusher. *Vestnik molodezhnoy nauki Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(1):73–77. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46467211> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
32. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Konovalov V.I., Konovalova A.A. On the Choice of Rational Parameters of a Hammer Mill with a Monolithic Hammer. *Vestnik VSGUTU*. 2020;(1):55–60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42622809> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
33. Yarovoy M.N., Kornev A.S., Druzhinin R.A. [Influence of Peripheral Speed of Hammers and Diameter of the Working Chamber on the Value of Effective Power of Hammer Crusher]. *AgroEkoInfo*. 2022;(2). (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.51419/202122235>
34. Chekhunov O.A., Voronin V.V., Vorokhobin A.V. Plant for Preparation of Fertilizer Solution. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*. 2021;(2):45–56. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46334381> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
35. Vendin S.V., Saenko Yu.V., Semernina M.A. Grain Crusher with Combined Crushing Chamber. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*. 2021;(1):27–39. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45684596> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
36. Fedorenko I.Ya. [Fluctuations and Dynamic Stability of Grain Crusher Hammers]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;(4):98–107. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-210-4-98-107>
37. Fedorenko I.Ya. The Dynamic Properties of Hammer Grain Crusher with Vertical Drum Position. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(1):89–95. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44908773> (accessed 03.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

38. Petrov A.A., Shakhov V.A., Naumov D.V. Increasing the Productivity of the Grain Crusher Due to Improved Separation. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(3):159–162. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162>
39. Nanka O.V. [Methods of Mechanical Action in the Grinding of Feed Grain and Their Energy Assessment]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2014;(1):204–209. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22751524> (accessed 03.12.2022). (In Russ.)
40. Syrovatka V.I., Sergeev N.S. [Study of Dynamic Cutting Process of Rapeseed and Forage Grain]. *Vestnik MGAU*. 2008;(1):54–59. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10365958> (accessed 03.12.2022). (In Russ.)
41. Mironov K.Ye., Nizovtsev S.L. [Bulk Food Grinder]. Patent 2,737,143 Russian Federation. 2020 November 25. 4 p. (In Russ.)

Submitted 06.12.2022; revised 26.12.2022; accepted 29.12.2022

About the authors:

Aleksey V. Aleshkin, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanics and Engineering Graphics, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480>, Researcher ID: ABA-6228-2020, Scopus ID: 57190028500, usr00008@vyatsu.ru

Sergey Yu. Bulatov, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technical Service, Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, Researcher ID: ABC-3577-2020, bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Vladimir N. Nechaev, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor of the Chair of Technical and Biological Systems, Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>, Researcher ID: ABC-4742-2021, nechaev-v@list.ru

Sergey L. Nizovtsev, Dr.Sci. (Engr.), Postgraduate Student, Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University (22a Oktyabrskaya St., Knyaginino 606340, Russian Federation), 9910250@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Aleshkin – developing the theoretical background, writing the program.

S. Yu. Bulatov – scientific guidance, formulation of the main directions of research, critical analysis and revision of the text.

V. N. Nechaev – preparation of the initial version of the article, design of graphic material, analysis of the results.

S. L. Nizovtsev – formulating the purpose of the research, conducting a review of literary sources.

All authors have read and approved the final manuscript.