

4. Carstensen, J.T., Patel, M.R. (1977). Blending of irregularly shaped particles. *Powder Technology*. 17 (3): 273-282. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(77\)80031-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(77)80031-4).

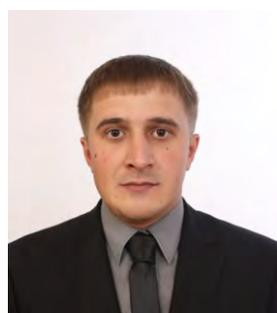
5. *Техника и технологии в животноводстве. Част 1. Механизация приготовления и раздачи кормов: учебное пособие /* I.Ia. Fedorenko, V.V. Sadov. – Barnaul: RIO AGAU, 2014. – 207 с.

6. Vedishchev, S.M. Sмеситель сушких рассыпчатых кормосмесей / S.M. Vedishchev, A.V. Prokhorov, N.V. Kholshchikov // *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki / Un-t im. V.I. Vernadskogo*. – 2012. – No. 4 (42).

7. Patent 2790980. Rossiiskaia Federatsiia MPK A 23 N17/00 Malogabaritnyi kombikormovyi agregat. Sadov V.V., Sorokin S.A. Patentobladatel FGBOU VO Altaiskii GAU. – No. 2022118346, zaiav. 05.07.2022; opubl. 01.03.2023 Biul. No. 7.

8. Grigorev A.M. *Vintovye konveierey*. – Moskva: Mashinostroenie, 1972. – 218 s.

9. Piskunov N.S. *Differentsialnoe i integralnoe ischislenie. V 2-kh kn.* – Moskva: Nauka, 1985. – 1008 s.



УДК 621.791.92:669.1

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-92-98

**Р.В. Бесподенов, И.Я. Федоренко,
Т.Н. Землянухина, М.В. Полковникова, А.В. Ишков**
R.V. Bepoldenov, I.Ya. Fedorenko,
T.N. Zemlyanukhina, M.V. Polkovnikova, A.V. Ishkov

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛОТКОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДРОБИЛКИ С ВОЗДУШНО-ЗЕРНОВЫМ СЛОЕМ

INVESTIGATION AND MODELING OF INTERACTION OF HAMMERS OF A VERTICAL CRUSHER WITH AIR-GRAIN LAYER

Ключевые слова: дробилка, кормовое зерно, воздушно-зерновой слой, износ молотка, математическая модель, профиль изношенной детали.

Дробилки с вертикальным ротором имеют целый ряд преимуществ при приготовлении кормов для КРС в сравнении с широко применяемыми сейчас машинами с горизонтальным расположением ротора. Они нашли применение в животноводстве не только при измельчении кормового зерна, но при приготовлении грубых (фуражных) кормов и различных кормосмесей, где к компонентам предъявляются повышенные требования к физико-механическим параметрам, зоотехнической и кормовой ценности. В Алтайском крае такие дробилки стали одними из распространенных машин, развивают известную конструкцию и являются оригинальной, запатентованной разработкой коллектива ученых Алтайского ГАУ. С конца 90-х годов XX в. они устанавлива-

ются на автоматизированные комбикормовые агрегаты «Алтай» различной производительности. При работе молотковой дробилки с вертикальной осью около ее деки образуется устойчивый, вращающийся, двухфазный воздушно-зерновой слой, при контакте с которым и происходит изнашивание молотков дробилки, которое зависит от контактных напряжений, действующих в слое, и наработки. В статье получено теоретическое выражение для линейного износа молотка дробилки вида $L = Kt(r^3 - 3r_1^2 r + 2r_1^3)$, который зависит от характеристик слоя, свойств измельчаемого материала и времени измельчения, сложным образом – от расстояния от края молотка до оси его подвеса. Сопоставление теоретических кривых изнашивания с реальным профилем изношенных молотков показывает их идентичность и свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.

Keywords: *crusher, fodder grain, air-grain layer, hammer wear, mathematical model, worn part profile.*

Crushers with a vertical rotor have a number of advantages in the preparation of feeds for cattle in comparison with widely used machines with a horizontal rotor arrangement. Therefore, they have found application in animal husbandry not only in the grinding of fodder grain, but in the preparation of coarse (fodder) feeds and various feed mixtures where the components are subject to increased requirements for physical and mechanical parameters, animal husbandry and feed value. In the Altai Region, such crushers have become one of the most common machines; they continue a well-known design, and are an original, patented development of a team of scientists of the Altai State Agricul-

tural University. And since the late 1990s, they have been installed on automated feed mills "Altai" of various capacities. When a hammer crusher works with a vertical axis, a stable, rotating, two-phase air-grain layer is formed near its deck; upon contact with which the crusher hammers wear out and that depends on the contact stresses acting in the layer and the operating time. This paper discusses a theoretical expression for the linear wear of the crusher hammer which depends on the characteristics of the layer, the properties of the material being crushed and the grinding time, and in a complex way - from the distance from the edge of the hammer to the axis of its suspension. The comparison of theoretical wear curves with real profiles of worn hammers shows their identity and testifies to the adequacy of the proposed mathematical model.

Бесполденев Роман Викторович, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: roman3792007@rambler.ru.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Землянухина Татьяна Николаевна, к.с.-х.н., ст. науч. сотр., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: t.zemlyanukhina@mail.ru.

Полковникова Марина Викторовна, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: polkovnikova.1105@mail.ru.

Ишков Алексей Владимирович, к.х.н., д.т.н., доцент, профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: alekeyyishk@rambler.ru.

Bespoldenov Roman Viktorovich, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: roman3792007@rambler.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Zemlyanukhina Tatyana Nikolaevna, Cand. Agr. Sci., Senior Researcher, Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: t.zemlyanukhina@mail.ru.

Polkovnikova Marina Viktorovna, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: polkovnikova.1105@mail.ru.

Ishkov Aleksey Vladimirovich, Cand. Chem. Sci., Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: alekeyyishk@rambler.ru.

Введение

Дробление различных материалов (горных пород, строительных материалов, зерна, корнеплодов) является одной из самых энергозатратных операций в различных отраслях промышленности и АПК при переработке сырья минерального, растительного и животного происхождения [1-3]. В этом случае широко применяют молотковые дробилки различных конструкций, в которых ротор с закрепленными на нем молотками может располагаться как горизонтально, так и вертикально [4].

Дробилки с вертикальным ротором имеют целый ряд преимуществ при приготовлении кормов для КРС, в сравнении с широко применяемыми сейчас машинами с горизонтальным расположением ротора: меньшее количество деталей; простота балансировки, настройки и перенастройки; меньшая требовательность к размерам исходных кусков материала; более высокая производительность и ряд других преимуществ [5]. Поэтому такие машины нашли применение в АПК, животноводстве, в том числе

при приготовлении грубых (фуражных) кормов и различных кормосмесей, где к компонентам предъявляются повышенные требования как к физико-механическим параметрам (размеру частиц, качеству смешения, насыпной плотности и пр.), так и к их зоотехнической, кормовой ценности [6]. В нашем регионе кормодробилки с вертикальным ротором стали одними из распространенных машин, развивают конструкцию таких устройств, являются оригинальной, запатентованной разработкой коллектива ученых Алтайского ГАУ [7, 8]. С конца 90-х годов они устанавливаются на автоматизированные кормоприготовительные агрегаты «Алтай» различной производительности.

При всех своих преимуществах существенным недостатком этих дробилок, как оказалось, является небольшой ресурс (1-2 мес.) и повышенный износ их рабочих органов – молотков [9]. Ранее авторами были исследованы особенности изнашивания молотков (формирование различных фигур изнашивания молотков первой, второй и последующих секций), а также ма-

тематически описаны формы их характерных фигур изнашивания [9, 10], но при этом использовался нестрогий подход (основанный на схожести форм фигур изнашивания молотков и заостренных лезвий долот при их движении в почве). В работе [11] теоретически описано и исследовано взаимодействие зерна с боковой поверхностью молотков, благодаря которому часть зерна отбрасывается и разрушается о деку дробилки, и формируется особый, воздушно-зерновой слой в этих дробилках [2, 12, 13].

Цель работы – разработать математическую модель взаимодействия воздушно-зернового слоя с молотками дробилки с вертикальным расположением ротора, приводящую к формированию характерной фигуры изнашивания, а также проверить ее адекватность.

Материалы и методы

1. *Описание взаимодействий, постановка задачи.* Во время работы молотковой дробилки с вертикальной осью, например, при приготовлении зерновых смесей на основе кормового зерна, около ее деки 4 образуется двухфазный воздушно-зерновой слой 2 [12, 13], в который оказывается погруженной периферийная часть молотка 3 (рис. 1).

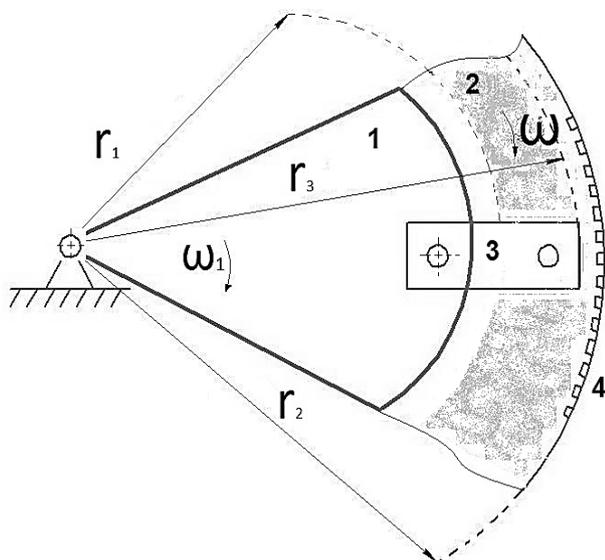


Рис. 1. Схема, поясняющая образование в дробилке воздушно-зернового слоя и взаимодействие молотка с ним:

1 – диск барабана; 2 – воздушно-зерновой слой; 3 – молоток; 4 – дека

При этом сам воздушно-зерновой слой циркулирует в рабочей камере дробилки, между

дисками 1 и деками 4, со скоростью ω , составляющей примерно половину угловой скорости ее молотков ω_1 .

Для кормодробилки основная твердая фаза этого слоя будет содержать основной измельчаемый материал (фуражное зерно, отруби, премиксы и пр.) [6], между частицами которого образуются пустоты, заполненные воздухом, пылью и мелкими фракциями измельчаемого продукта. Хотя состав такого зерно-воздушного слоя может постоянно изменяться, пока материал находится в дробилке, его усредненные параметры можно считать постоянными, так как весь исходный материал в конце процесса его измельчения выгружается, измельчение осуществляют до достижения определенного фракционного состава смеси, а время нахождения порции измельчаемого материала в дробилке ограничено, как правило, 3-10 с [14]. Поскольку воздушно-зерновой слой вращается, то на него действует центробежная сила, под действием которой он прижимается к деке и несколько уплотняется. Износ же молотков зависит от напряжений, действующих в слое, поэтому, в первую очередь, необходимо найти их теоретическое распределение.

Поставленная задача в постановке схожа с задачей о вращающемся диске [15, 16], хотя на диск действуют растягивающие напряжения, а не воздушно-сжимающие. Их природа и характер изменения по высоте слоя будут одинаковые. Кроме того, отличаются и краевые условия задачи. Тем не менее основные методические подходы задачи о вращающемся диске [18] будут использовать и в данной работе.

Условия равновесия элемента воздушно-зернового слоя, находящегося на расстоянии r от центра вращения барабана, запишем в полярных координатах $r\theta$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \rho\omega_1^2 r = 0, \quad (1)$$

где σ_r, σ_θ – радиальные и тангенциальные напряжения в слое;

ρ – средняя плотность слоя.

Уравнение (1) имеет приближительное решение вида [18]:

$$\sigma_r = C + \frac{3+\nu}{8} \rho\omega_1^2 r^2 = 0, \quad (2)$$

где C – постоянная интегрирования;
 ν – коэффициент Пуассона.

Постоянная интегрирования C определяется на основе краевого условия:

$$r = r_1; \quad \sigma_{r=r_1} = 0; \quad (3)$$

$$C = \frac{3+\nu}{8} \rho \omega_1^2 r_1^2. \quad (4)$$

Следовательно, закономерность изменения σ_r в слое можно представить в виде

$$\sigma_r = \frac{3+\nu}{8} \rho \omega_1^2 (r^2 - r_1^2). \quad (5)$$

2. *Теоретические и экспериментальные исследования.* После упрощения данной задачи аналитически решаемые дифференциальные уравнения использовали для моделирования взаимодействия зерна с боковой поверхностью молотка. Математические модели представляли собой зависимости линейного износа $L(r)$ от наработки (времени работы) t дробилки. Поведение моделей исследовали численным методом, используя специально составленные электронные таблицы Excel 2013, содержащие решения уравнений $L(r)$, а также их визуализацию средствами приложения.

Экспериментально износ молотков исследовали для дробилки, конструктивно объединенной в составе комбикормового агрегата «Алтай», установленного в АО «Учебно-опытное хозяйство «Пригородное». Опыты проводили в сентябре-ноябре 2022 г. на примере молотков 2-й и последующих секций ее ротора, с фиксированной наработкой в 50 и 135 т фуражной пшеницы при приготовлении комбикорма для КРС основного рациона.

Результаты и их обсуждение

Для определения сопротивления движению молотка в воздушно-зерновом слое нам необходимо знание не σ_r , а тангенциального напряжения σ_θ . Эти два напряжения связаны соотношением [17, 18]

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r), \quad (6)$$

где ε_θ – тангенциальная составляющая деформации слоя;

E – модуль упругости слоя.

Воздушно-зерновой слой является замкнутым, поэтому его тангенциальное расширение очень мало, т.е. можно положить $\varepsilon_\theta \approx 0$. С учетом этого из выражения (6) получим

$$\sigma_\theta = \nu \sigma_r. \quad (7)$$

Комбинируя (7) и (5), получим зависимость распределения тангенциальных напряжений в слое

$$\sigma_\theta = \frac{\nu(3+\nu)}{8} \rho \omega_1^2 (r^2 - r_1^2). \quad (8)$$

Данную зависимость можно использовать в различных технологических расчетах процесса измельчения в молотковых дробилках. Мы же покажем, как на основе этой зависимости можно прогнозировать характерную форму кривых изнашивания рабочей части молотка.

Фронтальная грань молотка изнашивается за счет движения по ней частиц слоя по направлению к деке. Элементарную работу dW , совершаемую при перемещении элемента слоя на расстояние dr , представим в виде

$$dW = f \sigma_\theta(r) dr, \quad (9)$$

где f – коэффициент трения материала по грани молотка.

Интегрируя выражение (9) с учетом (8), последовательно получаем

$$W = \frac{\nu(3+\nu)}{8} f \rho \omega_1^2 \int (r^2 - r_1^2) dr; \\ W = B \left(\frac{r^3}{3} - r_1^2 r \right) + C_1, \quad (10)$$

где $B = \frac{\nu(3+\nu)}{8} f \rho \omega_1^2$;

C_1 – постоянная интегрирования.

Постоянную интегрирования C_1 находим из условия, что при $r=r_1$, $W=0$, тогда $C_1 = \frac{2}{3} B r_1^3$.

Отсюда имеем

$$W = \frac{1}{3} B (r^3 - 3r_1^2 r + 2r_1^3). \quad (11)$$

По законам изнашивания линейный износ L зависит не только от W , но и времени работы t и свойств контакта, характеризуемого коэффициентом k [19]. Предполагая линейную зависимость от названных параметров, будем иметь:

$$L = \frac{1}{3} B k t (r^3 - 3r_1^2 r + 2r_1^3).$$

Обозначая произведение постоянных сомножителей коэффициентом $K = \frac{1}{3} B k$, окончательно получим

$$L = K t (r^3 - 3r_1^2 r + 2r_1^3). \quad (12)$$

Уравнение (12) фактически является математической моделью линейного износа боковой поверхности молотка дробилки, нелинейного в зависимости от радиуса (длины – в декартовых координатах), и линейного – в зависимости от времени работы дробилки (пропорционально ее наработке).

Для исследования поведения полученной модели в специальной форме электронной таблицы Excel 2013 получили семейство кривых $L = f(t, r)$, для различных наработок дробилки, таких что: $t_5 > t_4 > t_3 > t_2 > t_1$, причем относитель-

ное время t изменялось в интервале 0,001-10 с шагом увеличения (уменьшения) на порядок. Результаты теоретического исследования модели представляют собой семейство кривых, описываемых уравнением (12) для 5 различных значений относительного времени t (рис. 2).

Как следует из результатов, приведенных на рисунке 2, и их сопоставления с реальной формой изношенной рабочей части молотков, по-

груженной в воздушно-зерновой слой, при разной наработке [9, 10], предложенная нами модель, в целом, показывает неплохую адекватность. Для удобства сопоставления теоретических и экспериментальных значений по оси абсцисс отложены расстояния от центра вращения барабана r_1 (рис. 1) в интервале 0,26-0,29 м, а расчетная ширина молотка приведена к реальной – 0,05 м.

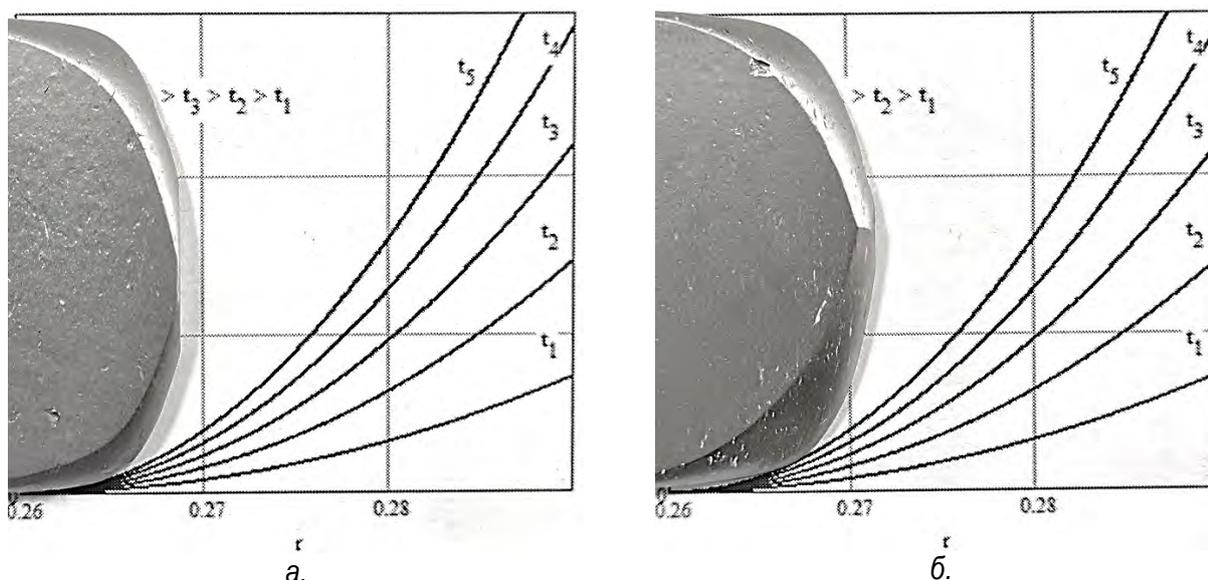


Рис. 2. Сопоставление теоретических кривых износа рабочей части молотка с реальной формой изношенных молотков при различной наработке: а – 50 м; б – 135 м

Как видно из приведенного рисунка, искомые зависимости носят существенно нелинейный характер, а теоретические фигуры изнашивания, по крайней мере в пространственных границах существования реального профиля изношенной рабочей части молотка (от его нижней основной плоскости до верхней), образуют семейство, в котором отыщется хотя бы одна кривая, отвечающая представленному реальному профилю.

Таким образом, обсуждаемые нами теоретические кривые являются одной из частных форм естественного износа молотков зернодробилок и могут адекватно описывать реальный процесс [10, 11]. Конструктивно и технологически можно рекомендовать изготавливать молотки именно с такой формой рабочей части, поскольку она обеспечивает минимум энергетических затрат в относительном движении измельчаемого материала и молотка [20], а необходимое качество измельчения фуражного зерна можно регулировать временем его пребывания в зерно-воздушном слое и упрочнением рабочей части

молотка, например, твердыми износостойкими материалами [21], но так, чтобы площадь зоны упрочнения полностью бы перекрывала границы формирующейся фигуры изнашивания [9, 20].

Выводы

1. Во время работы молотковой дробилки с вертикальной осью около ее деки образуется вращающийся, двухфазный воздушно-зерновой слой, при контактном взаимодействии с которым и происходит износ молотков 2-й и последующих секций, причем распределение напряжений в слое и время контакта с ним молотков и формируют теоретическую фигуру изнашивания рабочей части молотка.

2. Комбинация условия равновесия элемента воздушно-зернового слоя, находящегося на расстоянии r от центра вращения барабана, с выражением для работы по его перемещению вдоль фронтальной грани молотка в линейной износосектантной задаче позволили разработать математическую модель линейного износа молотка

дробилки вида $L = Kt(r^3 - 3r_1^2 r + 2r_1^3)$, который зависит от характеристик слоя, свойств измельчаемого материала и времени измельчения, расстояния от края молотка до оси его подвеса.

3. Реальный профиль износа молотка является криволинейной поверхностью сложной формы, но среди семейства теоретических кривых отыщется хотя бы одна, адекватно описывающая реальный профиль рабочей части молотка в его пространственных границах.

Библиографический список

1. Сиваченко, Л. А. История развития и современный уровень техники измельчения / Л. А. Сиваченко, Ю. К. Добровольский. – Текст: непосредственный // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 4 (37). – С. 69-76.
2. Dats N.A. (2015). Selecting of the crusher type that can provide the charge with a narrow range of granule size composition. *Metallurgical and Mining Industry*. 7 (5): 398-400.
3. Марченко, О. С. Основные проблемы механизации кормопроизводства и пути их решения / О. С. Марченко. – Текст: непосредственный // Техника в сельском хозяйстве. – 1990. – № 3. – С. 3-5.
4. Роторные дробилки. Исследование, конструирование, расчет и эксплуатация / В. А. Буман, А. И. Косарев, А. С. Слуцкер, В. А. Стрельцов. – Москва: Машиностроение, 1973. – 272 с. – Текст: непосредственный.
5. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Ленинград: Колос, 1978. – 560 с. – Текст: непосредственный.
6. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных: учебник / В. Г. Рядчиков. – Краснодар: КГАУ, 2014. – 616 с. – Текст: непосредственный.
7. Патент № 22116721 RU. Дробилка зерна / Желтунов М. Г., Демин В. А., Стрижов В. М. – Текст: непосредственный.
8. Патент РФ №226298 RU. Измельчитель зерновых и сыпучих материалов / Федоренко И. Я., Левин А. М., Желтунов М. Г. – Текст: непосредственный.
9. Полковникова, М. В. Особенности изнашивания молотков кормодробилок с вертикальной осью / М. В. Полковникова. – Текст: непосредственный // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1. – С. 63-66.
10. Полковникова, М. В. Моделирование изнашивания молотков кормодробилок с вертикальной осью / М. В. Полковникова, Д. Н. Лященко, А. В. Ишков. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 10 (216). – С. 126-131. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-126-131.
11. Полковникова, М. В. О взаимодействии измельчаемого материала с боковой поверхностью молотков в дробилках с вертикальной осью / М. В. Полковникова, Д. Н. Лященко, А. В. Ишков. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3 (221). С. 105-114. – DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-221-3-105-114>.
12. Navarro Sh., Noyes R.T. The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management. Boca Raton: CRC Press, 2001. -672 p.
13. Кузнецова, Е. А. Обзор научных исследований по измельчению зерна / Е. А. Кузнецова, П. А. Епифанов. – Текст: непосредственный // Агротехника и энергообеспечение. – 2017. – № 3 (16). – С. 21-26.
14. Федоренко, И. Я. Динамика молотковой дробилки с вертикальной осью вращения ротора / И. Я. Федоренко, В. В. Мозговых. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2004. – № 11 (61). – С. 69-74.
15. Демьянушко, И. В. Расчет на прочность вращающихся дисков / И. В. Демьянушко, И. А. Биргер. – Москва: Машиностроение, 1978. – 247 с. – Текст: непосредственный.
16. Nejad, M., Rastgoo, A., Hadi, A. (2014). Exact elasto-plastic analysis of rotating disks made of functionally graded materials. *International Journal of Engineering Science*. 85. 47–57. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2014.07.009.
17. Qian, W. X., Xie, L. Y., & Yin, X. W. (2010). Finite Element Analysis of a Compressor Disk. *Advanced Materials Research*. Vols. 118–120, pp. 49–53. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.118-120.49>.
18. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – Москва: Наука, 1988. – 712 с. – Текст: непосредственный.
19. Солдатенков, И. А. Износостойкая задача с приложениями к инженерному расчету

износа / И. А. Солдатенков. – Москва: Физмат-книга, 2010. – 160 с. – Текст: непосредственный.

20. Шульц, В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента / В. В. Шульц. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд., 1990. – 206 с. – Текст: непосредственный.

21. Власенко, Д. А. Способы снижения износа молотков дробилок ударного действия / Д. А. Власенко. – Текст: непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 2 (5). – С. 63-68.

References

1. Sivachenko L.A., Dobrovolskii Iu. K. Istoriia razvitiia i sovremennyi uroven tekhniki izmelcheniia // Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta. – 2012. – No. 4 (37). – S. 69-76.

2. Dats N.A. (2015). Selecting of the crusher type that can provide the charge with a narrow range of granule size composition. *Metallurgical and Mining Industry*. 7 (5): 398-400.

3. Marchenko O.S. Osnovnye problemy mekhanizatsii kormoproizvodstva i puti ikh resheniia // Tekhnika v selskom khoziaistve. – 1990. – No. 3. – S. 3-5.

4. Bauman V.A., Kosarev A.I., Slutsker A.S., Streltsov V.A. Rotornye dробилки. Issledovanie, konstruirovaniye, raschet i ekspluatatsiia. – Moskva: Mashinostroeniye, 1973. – 272 s.

5. Melnikov, S.V. Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia zhivotnovodcheskikh ferm. – Leningrad: Kolos, 1978. – 560 s.

6. Osnovy pitaniia i kormleniia selskokhoziaistvennykh zhivotnykh: uchebnyk / V. G. Riadchikov. – Krasnodar: KGAU, 2014. – 616 s

7. Patent No. 22116721 RU. Dробилка zerna / Zheltunov M.G., Demin V.A., Strizhov V.M.

8. Patent RF No. 226298 RU. Izmelchitel zernovykh i sypuchikh materialov / Fedorenko I.Ia., Levin A.M., Zheltunov M.G.

9. Polkovnikova M.V. Osobennosti iznashivaniia molotkov kormodrobilok s vertikalnoi osiu // Vestnik molodezhnoi nauki AGAU. – 2022. – No. 1. – S. 63-66.

10. Polkovnikova M.V., Liashchenko D.N., Ishkov A.V. Modelirovaniye iznashivaniia molotkov kormodrobilok s vertikalnoi osiu // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – № 10 (216). – S. 126-131. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-126-131.

11. Polkovnikova M.V., Liashchenko D.N., Ishkov A.V. O vzaimodeistvii izmelchaemogo materiala s bokovoi poverkhnostiю molotkov v dробилkakh s vertikalnoi osiu // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 3 (221). – S. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-221-3-105-114>.

12. Navarro Sh., Noyes R.T. The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management. Boca Raton: CRC Press, 2001. - 672 p.

13. Kuznetsova E.A., Epifanov P.A. Obzor nauchnykh issledovaniy po izmelcheniiю zerna // Agrotekhnika i energoobespecheniye. – 2017. – No. 3 (16). – S. 21-26.

14. Fedorenko I.Ia., Mozgovykh V.V. Dinamika molotkovoi dробилki s vertikalnoi osiu vrashcheniia rotora // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2004. – No. 11 (61). – S. 69-74.

15. Demianushko I.V., Birger I.A. Raschet na prochnost vrashchaiushchikhsia diskov. – Moskva: Mashinostroeniye, 1978. – 247 s.

16. Nejad, M., Rastgoo, A., Hadi, A. (2014). Exact elasto-plastic analysis of rotating disks made of functionally graded materials. *International Journal of Engineering Science*. 85. 47–57. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2014.07.009.

17. Qian, W. X., Xie, L. Y., & Yin, X. W. (2010). Finite Element Analysis of a Compressor Disk. *Advanced Materials Research*. Vols. 118–120, pp. 49–53. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.118-120.49>.

18. Rabotnov Iu.N. Mekhanika deformiruемого tverdogo tela. – Moskva: Nauka, 1988. – 712 s.

19. Soldatenkov I.A. Iznosokontaknaia zadacha s prilozheniiami k inzhenernomu raschetu iznosa. – Moskva: Fizmatkniga, 2010. – 160 s.

20. Shults V.V. Forma estestvennogo iznosa detalei mashin i instrumenta. – Leningrad: Mashinostroeniye. Leningr. отд., 1990. – 206 s.

21. Vlasenko D.A. Sposoby snizheniia iznosa molotkov dробилоk udarnogo deistviia // Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. – 2016. – No. 2 (5). – S. 63-68.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, в рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства» (Грант № 462ГССС15-Л/78541).

