

EDN: CJHEOY

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-3-23-30



Научная статья

УДК 631.363.2



Анализ эффективности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке

Михаил Геннадьевич Загоруйко,
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Игорь Андреевич Башмаков,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: igorbash@bk.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. В комбикормовой промышленности измельчение сельскохозяйственного сырья ударом относится к наиболее действенным способам подготовки кормов. Однако традиционные подходы к проектированию машин часто не учитывают сложные вероятностные механизмы разрушения частиц. Оборудование для этой операции должно работать экономично, обеспечивать равномерный помол с возможностью регулировки крупности, не перегревать сырье, минимизировать образование пыли и быть удобным в обслуживании. *(Цель исследования)* На основе анализа кинематики частицы в молотковой дробилке исследовать эффективность процесса дробления зерна. *(Материалы и методы)* Оценка эффективности процесса измельчения зерна в корпусе дробилки путем анализа кинематики зерновки в результате соударения ее с молотком и декой. *(Результаты и обсуждение)* Исходя из анализа кинетики зерновки при ее обработке в молотковой дробилке, выявлены зависимости, описывающие скорости соударения частицы с рабочими органами обрабатывающей машины. На основе полученных опытным путем или теоретически функций распределения по скоростям относительного числа разрушенных частиц с рабочими органами дробилки и рассчитанных кинематических характеристик частиц предложены математические выражения для определения коэффициента эффективности процесса ударного измельчения. *(Выводы)* На основе теории удара обоснована комплексная методика количественной оценки дробления зерна. Ее практическое применение позволит научно обоснованно подбирать оптимальные геометрические параметры оборудования и рациональные технологические режимы работы. Это обеспечит строгое соблюдение зоотехнических требований к гранулометрическому составу кормов для разных групп животных, снизит общую энергоемкость производства и позволит своевременно диагностировать критический износ рабочих органов.

Ключевые слова: комбикорм, дробилка, частица, молоток, теория удара, измельчение.

■ **Для цитирования:** Загоруйко М.Г., Башмаков И.А. Анализ эффективности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №3. С. 23-30. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-3-23-30. EDN: CJHEOY.

Scientific article

Analysis of Grain-Grinding Efficiency in a Hammer Crusher

Michail G. Zagoruiko,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor, leading researcher,
e-mail: zagorujko.misha2013@yandex.ru;

Igor A. Bashmakov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: igorbash@bk.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the compound feed industry, impact grinding is one of the most effective methods for processing agricultural raw materials. However, conventional approaches to the design of grinding equipment do not always adequately account for the complex probabilistic nature of particle breakage. Such equipment should ensure energy-efficient operation and uniform grinding to a specified particle-size distribution, while preventing overheating of the raw material, minimizing dust formation, and facilitating maintenance. *(Research purpose)* To investigate the efficiency of grain grinding based on an analysis of particle kinematics in a hammer crusher. *(Materials and methods)* Grain-grinding efficiency in a hammer crusher was evaluated by analyzing the kinematics of a grain kernel during their impacts with the hammer and the deck. *(Results and discussion)* Based on an analysis of grain-kernel kinematics during processing in a hammer crusher, relationships describing the velocities at which particles collide with the working elements of the machine were identified. Mathematical expressions were proposed for determining the efficiency coefficient of the impact-grinding process using empirically or theoretically obtained distribution functions describing

the relative proportion of particles fractured at different impact velocities together with the calculated kinematic characteristics of the particle. (*Conclusions*) Based on impact theory, a comprehensive method for the quantitative assessment of grain grinding was substantiated. Its practical application will enable the scientifically grounded selection of optimal equipment geometry and rational operating conditions. This approach will ensure compliance with zootechnical requirements for the particle-size distribution of feeds intended for different animal groups, reduce overall energy consumption during production, and enable timely detection of critical wear of the working elements.

Keywords: compound feed, hammer crusher, grain particle, hammer, impact theory, impact grinding.

For citation: Zagoruiko M.G., Bashmakov I.A. Analysis of grain-grinding efficiency in a hammer crusher. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N3. 23-30 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-3-23-30. EDN: CJHEOY.

Особенности компонентов и требования к крупности частиц – основные показатели, которые необходимо учитывать при выборе дробильно-измельчительного оборудования для приготовления комбикормов [1, 2]. На дробление и измельчение расходуется до 70% всех затрат электроэнергии в комбикормовом производстве. Важно для этих процессов правильно выбрать не только тип машины, но и оптимальные кинематические и нагрузочные параметры [3-5].

К эффективным способам измельчения относится ударное действие [6, 7]. Технологические машины для измельчения зерна должны обеспечивать минимальную энергоемкость, равномерное измельчение, регулирование степени дисперсности, незначительное нагревание материала, минимальное количество в продукте мучной пыли, быструю и простую переналадку деталей и узлов [8, 9]. Этим требованиям наиболее полно соответствуют молотковые дробилки. Однако процесс измельчения в них зерна изучен недостаточно, что отрицательно сказывается на практике проектирования и изготовления машин ударного действия. Для обоснования оптимальных геометрических размеров машины и рациональных физико-механических параметров ударного измельчения зерна актуальным является углубленный теоретический и экспериментальный анализ кинетики дробления зерна в корпусе молотковой дробилки.

Цель исследования: на основе анализа кинематики частицы в молотковой дробилке исследовать эффективность процесса дробления зерна.

Материалы и методы. Оценка эффективности измельчения зерна в корпусе дробилки проводилась путем анализа кинематики зерновки в результате соударения ее с молотком и декой.

В качестве основных рабочих органов дробилки используется молотковый ротор, который составлен из насаженных на его горизонтальный вал ярусов радиально расположенных молотков, и дека – внутренняя рифленая цилиндрическая поверхность (рис. 1).

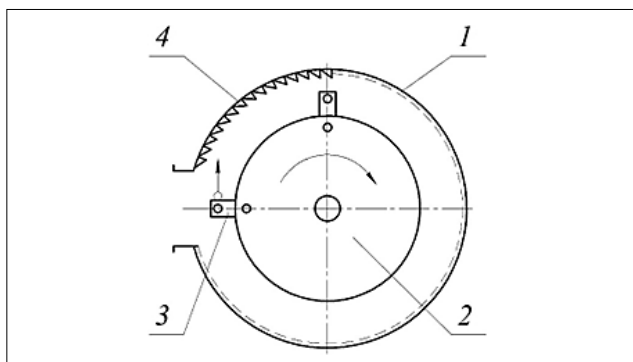


Рис. 1. Схема к анализу процесса обработки зерновки в молотковой дробилке: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – молоток; 4 – дека

Fig. 1. Schematic diagram for analyzing grain-kernel processing in a hammer crusher: 1 – housing; 2 – rotor; 3 – hammer; 4 – deck (corrugated liner)

Поступающий из бункера продукт сначала подвергается удару со стороны вращающегося с большой скоростью молотка, а отскакивая от молотка частица ударяется либо о деку, либо о другие (другую) частицы. Причем наиболее эффективным с точки зрения разрушения зерна ударом, развивающимся при более высоких скоростях соударения, чем при ударе молотка о частицу, является повторный удар зерновки (если она предварительно не разрушилась) о деку [10].

Дальнейшее перемещение зерновок в корпусе дробилки практически теряет детерминированный характер и становится хаотическим с преимущественным движением в окружном направлении в виде измельченного закрученного разрыхленного слоя, увлекаемого молотками. Очевидно, что соударения зерновок между собой из коллектива частиц с одинаково направленной окружной составляющей скорости движения или при ударе их о молоток вследствие не очень больших относительных скоростей соударения, становятся малоэффективными с точки зрения ударного разрушения частиц. Кроме того, учитывая, что значение окружной скорости коллектива частиц достигает значительной величины (20 м/с и более), то большое значе-

ние приобретают и центробежные силы, действующие на частицы зерна. Поэтому закрученный слой с одной стороны прижимается к цилиндрической поверхности деки или сита, а с другой стороны из-за ярко выраженного сдвигового характера движения потока смеси в нем развиваются значительные касательные напряжения между прилегающими к корпусу дробилки частицами и поверхностью деки или сита.

Таким образом, процесс измельчения зерна в корпусе дробилки можно условно разбить на два этапа: сначала происходит обработка зерновок при соударении их с молотком и декой (или другими частицами), затем продукты дробления подвергаются обработке истиранием в условиях развития сдвиговых напряжений между частицами и неподвижными органами дробилки (дека, сито). Причем на втором этапе происходит переизмельчение зерна, а также износ ситовой поверхности, при этом возрастает энергоемкость процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При исследовании кинематики частицы на первом этапе обработки ее в корпусе дробилки принимаются допущения о том, что зерновка имеет сферическую форму, а молоток цилиндрическую (примерно такую в процессе эксплуатации принимает рабочая грань молотка в результате многих ударных столкновений с зерном), скоростью частицы до соударения с молотком, влиянием силы тяжести и аэродинамического сопротивления на движение частицы, а также отклонением молотка при ударе пренебрегаем. Кроме того, считаем, что удар частицы о молоток является центральным, проскальзывание частиц при ударах о рабочие органы дробилки и соударениях между собой отсутствует.

При анализе ударного взаимодействия частицы с молотком целесообразно обращать внимание на это явление, предполагая, что молоток покоится, а частица ударяется по нему, имея горизонтальную скорость $v = v_0$ (где $v_0 = \omega\rho$, ω – угловая скорость ротора, ρ – радиальное расстояние от оси вращения ротора до места контакта частицы и молотка (см. рис. 1)).

Чтобы рассчитать скорость частицы после удара исходим из того, что в точке A касательные и нормальные составляющие скорости частицы (по модулю) до и после соударения связаны соотношениями (рис. 2):

$$v_\tau = v \sin \varphi, v_n = v \cos \varphi, u_\tau = u \sin \vartheta, u_n = u \cos \vartheta, \quad (1)$$

где v и u – соответственно скорости частицы до и после удара, м/с; φ и ϑ – угол падения и угол отражения частицы.

Как следует из теории удара [11],

$$u_\tau = v_\tau, \quad (2)$$

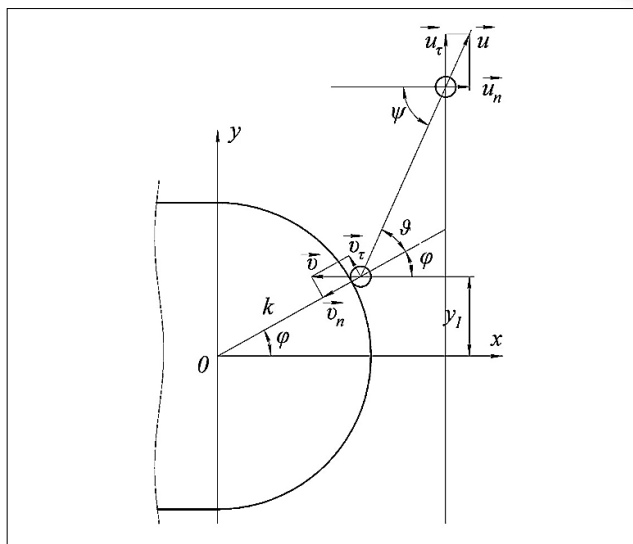


Рис. 2. Схема к расчету кинематики частицы при соударении ее с молотком и декой

Fig. 2. Schematic diagram for calculating particle kinematics during impact with the hammer and deck (corrugated liner) hammer and a deck

кроме того, в соответствии с неупругим характером соударения частицы и молотка

$$u_n = -kv_n, \quad (3)$$

где k – коэффициент восстановления ($k < 1$).

В таком случае из формул (1)–(3) вытекает, что

$$\operatorname{tg} \vartheta = \operatorname{tg} \frac{\varphi}{k}, \quad \vartheta = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{k} \right). \quad (4)$$

Таким образом, проекции по осям x и y скорости частицы после удара имеют вид:

$$u_x = u \cos \psi, \quad u_y = u \sin \psi, \quad \psi = \varphi + \vartheta, \quad (5)$$

причем в силу (2), (3)

$$u = (u_\tau^2 + u_n^2)^{1/2} = (v_\tau^2 + k^2 v_n^2)^{1/2} = xv_0, \quad (6)$$

где

$$x = (\sin^2 \varphi + k^2 \cos^2 \varphi)^{1/2}. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что полученные согласно (5) u_x и u_y по своему смыслу представляют собой относительные скорости частицы, то в неподвижной системе координат, проводя замену

$u_x \rightarrow u_x + v_0, u_y \rightarrow u_y$, получим:

$$u_x = v_0(1 + \cos \psi), u_y = v_0 x \sin \psi, \quad (8)$$

где u_x и u_y – проекции скорости частицы после удара в неподвижной системе координат.

Проверка формул (4)–(8) по предельным значениям угла падения показывает следующее:

- при $\varphi = 0$ угол отражения $\vartheta = 0$, $\psi = 0$, $u_x = v_0(1 + k)$, $u_y = 0$, т.е. имеем прямой центральный удар частицы о молоток;
- при $\varphi = \pi/2$ соответственно $\vartheta = \pi/2$, $\psi = \pi$,

$u_x = 0, u_y = 0$, т.е. получаем скользящий удар. При этом, как вытекает из (8):

$$u = \omega r(1 + 2x \cos \psi + x^2)^{1/2}, \quad (9)$$

и, как следует из (9), $du/d\varphi < 0$, т.е. скорость отскока частицы от молотка уменьшается от максимального значения при угле падения $\varphi = 0$ до нулевого при $\varphi = \pi/2$.

Также из (9) вытекает, что скорость отскока зависит от величины r , и как показывают числовые оценки в реальных условиях значение $\Delta r/\rho_{\max}$ может достигать 8-10% (где $\Delta r = \rho_{\max} - \rho_{\min}$, $\rho_{\max}$ – расстояние от оси вращения ротора до верхней кромки молотка; $\rho_{\min}$ – наименьшее расстояние от оси ротора до точки соударения молотка и частицы). Поэтому изменение скорости отскока u существенно зависит от r , и эту зависимость следует учитывать при расчетах.

Если $t = 2\pi/n\omega$ (где n – количество молотков в одном ярусе) и зерно подается в корпус дробилки с высоты h монослоем, то за время t частица опускается вниз (с учетом того, что значение t невелико) на расстояние

$$\Delta r = \sqrt{2gh} t = 2\pi\sqrt{2gh}/(n\omega). \quad (10)$$

Если для определенности считать, что в одном ярусе четыре молотка ($n = 4$), то

$$\Delta r = (\pi/\omega)\sqrt{gh/2}. \quad (11)$$

Поэтому в целях учета влияния на скорость соударения u величины Δr в формуле (9) вместо r можно полагать

$$r = \rho_{\max} - \Delta r, \quad (12)$$

где Δr рассчитывают по формуле (11).

На основе найденного согласно (3) значения нормальной составляющей u_n скорости частицы после соударения с молотком и полученной опытным путем или теоретически зависимости функции распределения $\Phi(v_n) = n/n_0$ относительно числа частиц, неразрушенных в результате удара (где n – число неразрушенных частиц; n_0 – число частиц до удара) может быть рассчитано относительное число частиц, разрушенных в результате последовательного соударения с молотком и декой.

События «частица разрушилась при ударе о молоток», «частица разрушилась после отскока от молотка и соударения с декой» и «частица не разрушилась после соударения с молотком и декой» образуют полную группу событий. Поэтому, рассчитывая вероятность наступления последнего события как результат совместного появления двух событий «частица не разрушилась после соударения с молотком» и «частица оказалась целой после удара о деку», по теореме умножения вероятностей может быть найдена вероятность разрушения частицы либо после

удара о молоток, либо после соударения с декой [12].

Пусть $\varphi_v(v_n)$ и $\varphi_u(u_n)$ – функции распределения относительно числа неразрушенных частиц при ударе о молоток и при соударении с декой (очевидно, что зависимость Φ обусловлена формой и материалом молотка и деки). Причем согласно смыслу функции распределения Φ изменяется в пределах от 0 до 1 и является убывающей функцией нормальной составляющей скорости соударения. В таком случае, если $d\varphi$ – элемент угла падения частицы на молоток (при условии, что процесс соударения обратен), d_n' – количество частиц, отскочивших от молотка по дуге $d\varphi$ и не разрушившихся при соударении с декой, а n_1 – количество частиц, соударяющихся с молотком по дуге φ_1 (где φ_1 – предельное значение угла падения, при котором отскочившая от молотка частица еще достигает деку), то согласно теореме умножения вероятностей относительное число частиц, отскочивших от молотка по дуге $d\varphi$ и не разрушившихся при соударении с декой, составляет:

$$\begin{aligned} \frac{dn'}{n_1} &= \Phi_v(v_n)\Phi_u(u_n) \text{ или} \\ \frac{dy}{R} &= \Phi_v(v_n)\Phi_u(u_n) \cos \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Причем очевидно, что равенство (13) выполняется для значений угла φ , удовлетворяющего согласно (4) условию $\vartheta + \varphi < \psi_{\max}$ (рис. 2), где угол $\psi_{\max} < \pi/2$ обусловлен геометрией рабочей полости дробилки.

Входящее в (13) значение нормальной составляющей скорости u_n зависит от угла между вектором скорости частицы, отскочившей от молотка, и нормалью к поверхности деки. Учитывая, что расчет этого угла достаточно сложен, с небольшой погрешностью заменяем его на $\psi = \varphi + \vartheta$, т.е. на угол между скоростью и нормалью к плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа (рис. 2). В таком случае исходя из формул (1)-(5) и (13) получим

$$\begin{aligned} dn' &= \Phi_v(\vartheta_0 \cos \varphi)\Phi_u \times \\ &\times (xv_0 \cos \varphi \cos \psi)n_1 \cos \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда, интегрируя (14) по φ в пределах от 0 до $\varphi_1 = \varphi_{\max}$, найдем количество частиц, не разрушившихся при ударе о деку:

$$\begin{aligned} n' &= n_1 \int_0^{\varphi_1} \Phi_v(\vartheta_0 \cos \varphi)\Phi_u \times \\ &\times (xv_0 \cos \varphi \cos \psi) \cos \varphi d\varphi, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\varphi_1 = \varphi_{\max} = \psi_{\max} - \vartheta_{\max}$, углы ϑ и φ связаны зависимостью (4).

К рассчитанному по (15) количеству частиц, не разрушившихся при последовательном соударении с молотком и декой и сталкивающихся с молотком по дуге $0 \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$, следует добавить количество частиц, соударяющихся только с молотком, не разрушающихся при ударе и не достигающих деки, т.е.

частиц, соприкасающихся с молотком по дуге $\varphi_1 < \varphi \leq \pi/2$ (косой удар). Очевидно, что это количество по аналогии с (15) составляет:

$$n = n_2 \int_{\varphi_1}^{\pi/2} \Phi_v(\vartheta_0 \cos \varphi) \cos \varphi d\varphi, \quad (16)$$

при этом если n – количество частиц, соударяющихся с молотком, то

$$n_1 = yn/R = n \sin \varphi_1, n_2 = (R - y)n/R = n \cos \varphi_1. \quad (17)$$

В таком случае общее количество частиц, не разрушенных при соударении с молотком и декой, составляет $N = n' + n''$ (где n' и n'' вычисляются по (15) и (16), а количество разрушенных частиц

$$n - N = n - (n' + n''). \quad (18)$$

Тогда в качестве коэффициента эффективности процесса измельчения частиц зерна в молотковой дробилке принимаем

$$\begin{aligned} \eta_i = n - (n' + n'')/n &= 1 - \frac{n' \sin \varphi_1}{n_1} - \frac{n'' \cos \varphi_1}{n_2} = \\ &= 1 - \int_0^{\varphi_1} \Phi_v(v_0 \cos \varphi) \Phi_u(xv_0 \cos \varphi \cos \psi) \cos \varphi d\varphi - \\ &- \int_{\varphi_2}^{\pi/2} \Phi_v(v_0 \cos \varphi) \cos \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (19)$$

Проверка формулы (19) на асимптотику для предельных значений скорости соударения v_0 частицы и молотка показывает, что с учетом предельных значений характеристических функций $\lim_{v \rightarrow \infty} \Phi_v(v) = 0$, $\lim_{u \rightarrow \infty} \Phi_u(u) = 0$, имеем:

$$\begin{aligned} \lim_{v_0 \rightarrow 0} \eta &= 1 - \int_0^{\varphi_1} \cos \varphi d\varphi - \int_{\varphi_1}^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi = \\ \cos \varphi d\varphi &= 1 - \int_0^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi = 0, \\ \lim_{v_0 \rightarrow \infty} \eta &= 1. \end{aligned} \quad (20)$$

Иначе говоря, эффективность процесса при малых скоростях соударения стремится к 0, а при больших скоростях соударения – к 1, как и следовало ожидать исходя из смысла коэффициента эффективности η процесса измельчения.

С другой стороны, рассматривая случай абсолютно неупругого соударения частицы с молотком, т.е. считая, что коэффициент восстановления $k \rightarrow 0$, в соответствии с (4) получим $\vartheta \rightarrow \pi/2$, т.е. при абсолютно неупругом соударении частица отскакивает от молотка по касательной в месте контакта. Тогда очевидно, что частица не достигает деки, и в формуле (19) следует полагать $\varphi_1 = 0$.

Как показывает статистическая обработка результатов наблюдений по удельной энергии измельчения и однозначно связанным с нею критическим скоростям соударения (т.е. скоростям прямого удара, при котором происходит разрушение частиц) зерновок различных культур, характеристическая функция распределения относительного числа раз-

рушенных при ударе частиц удовлетворительно описывается двухпараметрическим уравнением Вейбула – Гнеденко [13]:

$$\Phi_v(v) = \exp(-\alpha_0 v^{\alpha_v}), \quad (21)$$

где α_0 и α_v – определяемые эмпирическим путем положительные коэффициенты.

Если считать, что характеристические функции распределения Φ_v и Φ_u заданы в явном виде, например в виде зависимости (21), то коэффициент эффективности процесса измельчения зерна может быть найден путем численного интегрирования.

Проведенное исследование процесса измельчения зерна в корпусе дробилки основано на анализе вероятностной модели явлений соударения частиц с рабочими органами измельчающей машины и исходит из того, что предполагаются известными статистические вероятностные характеристики процесса в виде функций распределения по критическим скоростям относительного числа разрушенных при ударах частиц. В силу того, что при этом собственно процесс разрушения частицы при соударении с рабочими органами дробилки рассматривается как явление случайного характера, такой подход к анализу эффективности процесса измельчения зерна условно назовем стохастическим.

В том случае, когда статистические сведения о процессе отсутствуют, к анализу исследуемой проблемы может быть применен подход, который назовем детерминированным. Этот подход основан на применении к анализу процесса измельчения частиц ударом формул расчета критических значений скоростей разрушения, полученных, например, с помощью динамической теории разрушения, в частности, исходя из теории разрушения тел как результата развития в них трещин под действием ударных нагрузок [14, 15].

Если известна скорость разрушения v_k частицы при прямом ударе (критическая скорость), то в допущении, что $v_k < v_0 = \omega r$ вследствие (1), может быть найдено предельное значение угла падения $\varphi = \varphi'_k$, при котором нормальная проекция скорости частицы равна критической:

$$\varphi_k = \arccos(v_k/v_0). \quad (22)$$

Согласно определению критической скорости, все частицы, соударяющиеся с молотком по углу $0 \leq \varphi \leq \varphi'_k$, разрушаются при ударе. При этом относительное количество таких частиц среди всех других, соприкасающихся с молотком, составляет

$$\eta = \rho' = \frac{n'}{n} = \frac{y'}{R} = \sin \varphi_k = \sqrt{1 - (v_k/v_0)^2}, \quad (23)$$

где n' и n – соответственно количество частиц, соударяющихся с молотком по дуге $0 \leq \varphi \leq \varphi'_k$ и по дуге $0 \leq \varphi \leq \pi/2$.

Тогда если ввести обозначение $\zeta = v_k/v_0$, то учи-

тывая, что в декартовой прямоугольной системе координат $\xi\eta$ формула (23) описывает окружность единичного радиуса с центром в начале координат, коэффициент эффективности процесса измельчения определяется как ордината точки на этой окружности с абсциссой $\xi = v_k/v_0$. Поскольку частицы, соприкасающиеся с молотком по углу падения $\varphi > \varphi_1$, имеют нормальную имеет скорость меньше по значению, чем v_k , то они могут разрушаться лишь при соударении с декой. Если при этом u_k – критическая скорость прямого удара частицы о деку, то предельное значение угла падения частицы на деку согласно (1)-(7) определяется по соотношению:

$$u_k = x v_0 \cos \psi, \quad (24)$$

откуда

$$\psi = \psi_k = \arccos[u_k/(x v_0)];$$

$$\varphi''_k + \arctg\left(\frac{tg\varphi''_k}{k}\right) = \psi_k. \quad (25)$$

Значение критического угла φ_k'' следует определять численным путем как корень трансцендентного уравнения (25). Если при этом окажется, что $\varphi_k < \varphi_k'$, то очевидно, что деку достигают лишь фрагменты частиц, разрушенных при соударении с молотком. В свою очередь, согласно принятой схеме зерновки, соударяющиеся с молотком по дуге $\varphi' < \varphi \leq \varphi''$, разрушаются при ударе о деку. Относительное количество таких частиц:

$$\begin{aligned} \rho &= n''/n = (y'' - y')/R = \\ &= \sin \varphi''_k - \sin \varphi'_k. \end{aligned} \quad (26)$$

Поскольку общее число разрушенных частиц составляет $N = n' + n''$, то согласно (23), (26) может быть найден коэффициент эффективности процесса измельчения при детерминированном подходе к анализу этого процесса:

$$\eta = (n' + n'') / n = \sin \varphi''_k. \quad (27)$$

Таким образом, пришли к формуле простого вида, зависящей лишь от угла φ_k'' , связанного в соответствии с (25) с основными параметрами исследуемого процесса.

В качестве исходной расчетной критической скорости разрушения частицы при ударе о молоток может быть принята

$$v_k = \frac{\tau}{\rho_T} \left[\frac{2\pi\gamma E}{(1+\nu)(2-\nu)a^3} \right]^{1/2}, \quad (28)$$

где τ – время действия ударного импульса, с; ρ_T – плотность зерновки, кг/м³; γ – константа, характеризующая поверхностную плотность энергии на разрыв, Н/м; E – модуль упругости, Па; ν – модуль Пуассона; a – размер частицы, м.

Критическую скорость частицы при ударе частицы о деку можно вычислить по формуле:

$$u_k = v_k / (1 + k), \quad (29)$$

где критическая скорость v_k рассчитывается согласно (28); k – коэффициент восстановления при ударе частицы о деку.

Предложенную методику расчета коэффициента эффективности процесса измельчения зерна в корпусе дробилки можно использовать для количественного анализа процесса дробления компонента комбикормового сырья.

Выводы. Исходя из теории удара обоснована методика количественной оценки процесса измельчения зерна в молотковой дробилке, которая позволит подобрать оптимальные режимы работы оборудования, чтобы получить продукт нужной крупности при минимальном расходе электроэнергии. Это поможет соблюсти зоотехнические требования к гранулометрическому составу для разных видов животных, оценить техническое состояние рабочих органов и вовремя заметить снижение их производительности или износ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Елисеев М.С., Загоруйко М.Г., Рыбалкин Д.А. Анализ факторов, влияющих на эффективность процесса измельчения // *Аграрный научный журнал*. 2017. N7. С. 62-66. EDN: WQWXYT.
- Нехорошев Д.А., Нехорошев Д.Д., Бирюков М.А. и др. Исследование процесса измельчения злаковых культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2025. N1(79). С. 410-417. DOI: 10.32786/2071-9485-2025-01-44.
- Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Шахов В.А. и др. Теоретическая модель процесса реализации энергетических затрат при ударном измельчении зернового сырья // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. N11. С. 80-85. DOI: 10.53859/02352451_2022_36_11_8.
- Бесподенов Р.В., Федоренко И.Я., Землянухина Т.Н. и др. Исследование и моделирование взаимодействия молотков вертикальной дробилки с воздушно-зерновым слоем // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. N4(222). С. 92-98. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-92-98.
- Елисеев М.С., Загоруйко М.Г., Елисеев И.И., Рыбалкин Д.Ф. Разработка средств механизации по измельчению отходов переработки бакалейной группы сельскохозяйственной продукции // *Аграрный научный журнал*. 2016. N4. С. 54-57. EDN: VVZHF.
- Коюшева Е.С., Степанова Я.Ю., Суворов Г.А. О применении оборудования в производстве кормов // *Управление рисками в АПК*. 2019. N2(30). С. 43-68. DOI: 10.53988/24136573-2019-02-04.
- Мишуrow Н.П. Рекомендуемые технологии производ-

- ства комбикормов в хозяйствах // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства*. 2015. N4(20). С. 6-14. EDN: VBWKEV.
8. Лебедев А.Т., Искендеров Р.Р., Шумский А.С. Обоснование конструктивных параметров горизонтального роторного агрегата для дробления фуражного зерна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N5. С. 9-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-5-9-13.
 9. Ульянов В.М., Утолин В.В., Тугеев Д.Э., Ефремов Д.Н. Критерий рабочего процесса и конструкция измельчителя растительных материалов // *Вестник аграрной науки Дона*. 2023. Т. 16. N1(61). С. 66-75. DOI: 10.55618/20756704_2023_16_1_66-75.
 10. Клевцова Т.А., Пупынин А.А. Поиск конструктивных решений дробилок зерна для повышения эффективности дробления // *Вестник аграрной науки Дона*. 2024. Т. 17. N1(65). С. 22-29. DOI: 10.55618/20756704_2024_17_1_22-29.
 11. Власенко Д.А., Левченко Э.П., Билан Г.А. Математическое моделирование процесса изнашивания молотков при дроблении материала свободным ударом // *Вестник Донецкого национального технического университета*. 2019. N1(15). С. 8-16. EDN: ZBOBNB.
 12. Баранов Н.Ф., Фарафонов В.Г., Лопатин Л.А. Исследование взаимодействия частиц с рабочими органами молотковой дробилки // *Пермский аграрный вестник*. 2018. N3(23). С. 4-11. EDN: YNMXXKH.
 13. Азимова Н.Н., Бедойдзе М.В., Богданец Д.А. и др. Модельные распределения математической статистики в гранулометрическом анализе // *Инженерный вестник Дона*. 2025. N1(121). С. 535-543. EDN: ZWJVWJ.
 14. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Кабанцев О.В. и др. Разрушение хрупких материалов в условиях неоднократного ударного нагружения // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2007. Т. 13. N1. С. 57-70. EDN: КРАЖАР.
 15. Гурьянов Г.А., Абдеев Б.М., Клименко Е.А. Прикладная модель измельчения твердой частицы простой формы ударом о жесткую поверхность // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2018. N1. С. 110-120. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.1.10.

REFERENCES

1. Eliseev M.S., Zagoruyko M.G., Rybalkin D.A. Analysis of the factors affecting the effectiveness of the grinding operation. *Agrarian Scientific Journal*. 2017. N7. 62-66 (In Russian). EDN: WQWXYT.
2. Nekhoroshev D.A., Nekhoroshev D.D., Biryukov M.A., Nekhoroshev N.D. Study of the grinding cereal crops process. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2025. N1(79). 410-417 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2025-01-44.
3. Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Shakhov V.A. et al. Theoretical model of the energy costs realization process during shock grinding of grain raw materials. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2022. Vol. 36, N11. 80-85 (In Russian). DOI: 10.53859/02352451_2022_36_11_80.
4. Bepoldenov R.V., Fedorenko I.Ya., Zemlyanukhina T.N. et al. Investigation and modeling of interaction of hammers of a vertical crusher with air-grain layer. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2023. N4(222). 92-98 (In Russian). DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-92-98.
5. Eliseev M.S., Zagoruiko M.G., Eliseev I.I., Rybalkin D.A. Development of mechanization equipment for crushing waste recycling grocery group agricultural products. *Agrarian Scientific Journal*. 2016. N4. 54-57 (In Russian). EDN: VVZHFP.
6. Koyusheva E.S., Stepanova Ya.Yu., Suvorov G.A. On the use of equipment in the production of feed. *Agricultural Risk Management*. 2019. N2(30). 43-68 (In Russian). DOI: 10.53988/24136573-2019-02-04.
7. Mishurov N.P. Recommended technologies of combined feed's production in farms. *Journal of VNIMZH*. 2015. N4(20). 6-14 (In Russian). EDN: VBWKEV.
8. Lebedev A.T., Iskanderov R.R., Shumsky A.S. Determination of design parameters for horizontal rotary crushers for feed grain. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N5. 9-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-5-9-13
9. Ulyanov V.M., Utolin V.V., Tugeev D.E., Efremov D.N. Criterion of the working process and the design of a feed chopper. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2023. Vol. 16. N1(61). 66-75 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2023_16_1_66-75.
10. Klevtsova T.A., Pupynin A.A. Search for constructive solutions for grain crushers to improve crushing efficiency. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2024. Vol. 17. N1(65). 22-29 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2024_17_1_22-29.
11. Vlasenko D.A., Levchenko E.P., Bilan G.A. Mathematical modeling of the process of hammers wear at free impact crushing the material. *Vestnik Donetsk National Technical University*. 2019. N1(15). 8-16 (In Russian). EDN: ZBOBNB.
12. Baranov N.F., Farafonov V.G., Lopatin L.A. Investigation of particle interaction with working bodies of hammer mill. *Perm Agrarian Journal*. 2018. N3(23). 4-11 (In Russian). EDN: YNMXXKH.
13. Azimova N.N., Bedoidze M.V., Bogdanets D.A. et al. Model distributions of mathematical statistics in granulometric analysis. *Engineering Journal of Don*. 2025. N1(121). 535-543 (In Russian). EDN: ZWJVWJ.
14. Belov N.N., Yugov N.T., Kabantsev O.V. et al. Fracture of

brittle materials under repeated impact loading. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2007. Vol. 13. N1. 57-70 (In Russian). EDN: KPAJAP.
15. Guryanov G.A., Abdeev B.M., Klimenko Ye.A. Applied

grinding model of a solid particle with a simple shape on impact with a hard surface. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2018. N1. 110-120 (In Russian). DOI: 10.15593/perm.mech/2018.1.10.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Загоруйко М.Г. – постановка цели и задач исследования, написание методической части, части раздела «Результаты и обсуждение» и выводов;
Башмаков И.А. – написание введения и реферата, подготовка графических материалов, участие в написание раздела «Результаты и обсуждение», подбор и анализ литературы.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Zagoruiko M.G. – formulation of the research aim and objectives, preparation of the methodology section, contribution to the Results and Discussion section, and the Conclusions;
Bashmakov I.A. – preparation of the Introduction and Abstract, preparation of graphical materials, contribution to the Results and Discussion section, literature search and analysis.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

30.06.2026
14.08.2026