



ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ РОТОРНОГО ТИПА

✉ Кукаев Х.С.¹, Асманкин Е.М.¹, Ушаков Ю.А.¹, Абдюкаева А.Ф.¹, Наумов Д.В.²

¹Оренбургский государственный аграрный университет

Оренбург, Россия

²Оренбургский институт путей сообщения –

филиал Самарского государственного университета путей сообщения

Оренбург, Россия

✉ e-mail: kxamza@mail.ru

Изучены возможности энергосбережения при работе измельчителя зерна за счет повышения эффективности взаимодействия сырья с рабочими органами машины. Предложен измельчитель роторного типа, в котором частицы сырья разрушаются исключительно ударными воздействиями в процессе первичных ударов элементами вращающегося ротора и последующих вторичных ударов о неподвижные элементы камеры. При этом конструктивные параметры устройства обеспечивают частицам контакты с поверхностями ударных элементов под углами атаки, близкими к прямому углу, что обеспечивает высокую эффективность удара. Таким образом, каждая частица сырья в зоне удара испытывает только два, следующих друг за другом, контакта с ударными элементами, после чего частицы переработанного продукта выводятся из зоны удара. В такой схеме воздействия на сырье энергия ротора используется наиболее рационально. Эффективность работы предлагаемого устройства рассмотрена на основе потерь кинетической энергии, которые происходят при ударе частиц о поверхности рабочих органов. Взаимодействия сырья с элементами ротора и элементами камеры изучены как единый взаимосвязанный процесс, а совокупность ударных элементов ротора и камеры выделены в конструктивную единицу. Найдено аналитическое выражение, определяющее общие энергетические затраты, необходимые для реализации ударных воздействий в предлагаемом устройстве. Также введен критерий, характеризующий эффективность измельчителя в потреблении механической энергии для разрушения сырья ударными воздействиями. По введенному критерию выполнено сравнение эффективности работы предлагаемого устройства и центробежной дробилки, в которой измельчение сырья также осуществляется ударными воздействиями.

Ключевые слова: измельчитель зерна, удар, потери энергии, эффективность

THEORETICAL STUDY OF THE ENERGY EFFICIENCY OF A ROTARY GRINDER

✉ Kukaev Kh.S.¹, Asmankin E.M.¹, Ushakov Yu.A.¹, Abdyukaeva A.F.¹, Naumov D.V.²

¹Orenburg State Agrarian University

Orenburg, Russia

²Orenburg Railway Engineering Institute – Branch of the Samara State Transport University

Orenburg, Russia

✉ e-mail: kxamza@mail.ru

The possibilities of energy saving in the work of a grain grinder by increasing the efficiency of interaction of raw materials with the working bodies of the machine have been studied. A rotary

grinder, in which the raw material particles are destroyed solely by impact actions in the process of primary impacts by the elements of the rotating rotor and the subsequent secondary impacts on the stationary elements of the chamber, is proposed. In this case, the design parameters of the device provide the particles with contacts with the surfaces of the impact elements at angles of attack close to the right angle, which ensures high impact efficiency. Thus, each raw material particle in the impact zone experiences only two successive contacts with the impact elements, after which the processed product particles are removed from the impact zone. In this scheme of action on the raw material the rotor energy is used most rationally. The effectiveness of the proposed device is considered on the basis of the loss of kinetic energy that occurs when the particles hit the surface of the working bodies. The interaction of the raw material with the rotor and chamber elements is studied as a single interrelated process, and the set of shock elements of the rotor and chamber are allocated as a structural unit. An analytical expression was found that determines the total energy cost required to implement the impact forces in the proposed device. A criterion that characterizes the efficiency of the grinder in the consumption of mechanical energy for the destruction of raw materials by impact forces is also introduced. A comparison of the efficiency of the proposed device and the centrifugal crusher, in which crushing of raw materials is also carried out by impact effects, is performed according to the introduced criterion.

Keywords: grain grinder, impact, energy loss, efficiency

Для цитирования: Кукаев Х.С., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Абдюкаева А.Ф., Наумов Д.В. Теоретическое исследование энергоэффективности измельчителя роторного типа // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2022. Т. 52. № 6. С. 103–110. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-6-12>

For citation: Kukaev Kh.S., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Abdyukaeva A.F., Naumov D.V. Theoretical study of the energy efficiency of a rotary grinder. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2022, vol. 52, no. 6, pp. 103–110. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-6-12>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Среди машин, применяемых для измельчения зернового сырья, широкое распространение получили роторные измельчители. Их популярность обусловлена следующими преимуществами: простота конструкции, надежность, универсальность, легкость в обслуживании. Совершенствование этих машин является актуальной задачей, особенно в аспекте снижения энергопотребления [1–5].

Один из путей совершенствования роторных измельчителей – уменьшение потребляемой энергии за счет повышения эффективности взаимодействия сырья с рабочими органами измельчителя¹ [6–8]. В рабочей камере измельчение сырья происходит в результате ударов элементами вращающегося ротора, а также ударов и истирания частиц

сырья о рабочие поверхности элементов камеры. Особенность работы роторных измельчителей в том, что ударное воздействие элемента ротора не только нагружает частицу, но и одновременно сообщает ей или обрзовавшимся фрагментам кинетическую энергию, которая затем расходуется при последующем взаимодействии с элементами камеры. Качество взаимодействия частицы с элементом камеры определяется тем, насколько полно используется запас ее энергии, полученной от ротора. В этом аспекте ряд исследователей отмечают, что главными причинами повышенных энергозатрат являются нерациональные потери энергии вследствие некачественных ударных воздействий на сырье, а также его трение об элементы камеры из-за кругового движения. [9, 10].

¹Денисов В.А. Расчет потребной мощности дробилки центробежноударного действия // Научные труды. Механизация и автоматизация приготовления кормов. М.: ВИЭСХ, 1986. Т. 66. С. 106–122.

Авторами предложен роторный измельчитель, в котором частицы сырья, попадая в рабочую камеру, разрушаются в процессе первичных ударов элементами вращающегося ротора (била) и последующих вторичных ударов о неподвижные элементы камеры (пластины) под углами атаки, близкими к 90° , что обеспечивает высокую эффективность ударных воздействий (см. рис. 1). При этом сырье подается в камеру перпендикулярно плоскости вращения ротора, и после взаимодействия с пластинами частицы переработанного продукта выводятся из зоны удара. Таким образом, частицы сырья в зоне удара испытывают только два контакта: с сообщением кинетической энергии (при ударе била) и с поглощением энергии (при ударе частицы о пластину). В таком способе измельчения отсутствует трение сырья, разрушение частиц происходит исключительно ударными воздействиями с высокой эффективностью. Следовательно, энергия ротора используется максимально рационально. Удар била полностью определяет последующий удар частицы о пластину, что позволяет рассмотреть и математически формализовать эти удары как единый процесс. В таком случае, била и пластины, соответствующие им, функционируют как единый орган, который можно назвать ударно-отражательной парой [11].

Цель исследования – теоретически изучить энергоэффективность работы предлагаемого измельчителя и найти аналитическое выражение, характеризующее затраты энергии для реализации процесса измельчения.

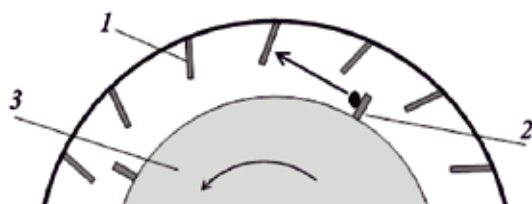


Рис. 1. Рабочие органы измельчителя (1 – пластина, 2 – било, 3 – ротор)

Fig. 1. Working bodies of the grain grinder (1 – plate, 2 – beater, 3 – rotor)

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Известно, что суммарная кинетическая энергия тел после столкновения оказывается меньше, чем до него². Потери энергии связаны с рядом возникающих при ударе физических процессов, в числе которых – деформация тел и развитие в их объемах дефектов (трещин и т.п.). Если целью удара является разрушение одного из сталкивающихся тел, то потери кинетической энергии косвенно показывают результативность удара. Тогда отношение потерь кинетической энергии к общим затратам энергии для реализации удара можно использовать в качестве критерия эффективности работы устройства, осуществляющего измельчение ударом.

Во взаимодействии сырья с ударно-отражательной парой общие потери кинетической энергии можно представить как сумму потерь энергии при взаимодействии с билем и при взаимодействии с пластиной. Будем считать, что все контакты частиц с поверхностями рабочих органов измельчителя происходят под прямым углом. В этом случае потери кинетической энергии ΔT можно найти по формуле (см. сноску 2)

$$\Delta T = (1 - k^2) \frac{m_1 m_2 (v_1 - v_2)^2}{2(m_1 + m_2)}, \quad (1)$$

где m_1, m_2 – массы сталкивающихся тел, кг; v_1, v_2 – скорости тел до соударения, м/с; k – коэффициент восстановления.

Рассмотрим взаимодействие била и частицы. Пусть M – масса била кг, m – масса частицы, кг, v – линейная скорость била, м/с. Начальная скорость частицы перед ударом намного меньше скорости била, поэтому для простоты примем ее равной нулю. Применим (1) для данного случая, тогда выражение потерь кинетической энергии при ударе била ΔT_6 примет следующий вид:

$$\Delta T_6 = (1 - k^2) \frac{M m v^2}{2(M + m)}. \quad (2)$$

Поскольку било жестко закреплено к ротору, то при контакте с частицей участвует большая часть массы ротора. Следовательно, масса частицы много меньше массы била

²Яблонский А.А. Курс теоретической механики: учебник для вузов /А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. М.: Интеграл-Пресс, 2006. 608 с.

($m \ll M$) и в знаменателе выражения (2) его можно пренебречь, а массу била сократить:

$$\Delta T_6 = (1 - k^2) \frac{mv^2}{2}. \quad (3)$$

После контакта с биллом частица может уцелеть или разрушиться на части. Во втором случае фрагменты разрушенной частицы отлетают от била, образуя конус разлета. Для упрощения будем считать, что фрагменты после удара имеют одинаковую скорость и движутся в направлении пластины вдоль центральной оси конуса разлета. Будем также полагать, что взаимодействие всех фрагментов частицы с пластиной эквивалентно соответствующему взаимодействию самой частицы, если бы она уцелела.

Скорость u , которую частица приобретает после удара била, можно найти, используя известное выражение (см. сноску 2)

$$u = v_2 + (1 + k) \frac{m_1 (v_1 - v_2)}{(m_1 + m_2)}, \quad (4)$$

которое с учетом $v_1 = v$, $v_2 = 0$, $m_1 = M$, $m_2 = m$, $m \ll M$ примет следующий вид:

$$u = (1 + k)v. \quad (5)$$

Положим, что скорость частицы u сохраняется до момента ее контакта с неподвижной пластиной массой $M_{\text{п}}$. Применим выражение (1) для нахождения потерь кинетической энергии $\Delta T_{\text{п}}$ при ударе частицы о пластину

$$\Delta T_{\text{п}} = (1 - k^2) \frac{mM_{\text{п}}u^2}{2(m + M_{\text{п}})}. \quad (6)$$

Пластина закреплена к корпусу камеры, следовательно $m \ll M_{\text{п}}$ и массой частицы в знаменателе можно пренебречь:

$$\Delta T_{\text{п}} = (1 - k^2) \frac{mu^2}{2}. \quad (7)$$

Необходимо учесть, что коэффициент восстановления в общем случае зависит от многих факторов, в том числе и от скорости удара. На основе проведенных экспериментов с различными зерновыми культурами

С.В. Зверев предложил следующую функциональную зависимость^{3,4}:

$$k = A - Bv - C\phi, \quad (8)$$

где A, B, C – эмпирические коэффициенты, v – скорость удара, м/с; ϕ – влажность зерна, %.

По формуле (5) скорость столкновения частицы с пластиной больше, чем при столкновении с биллом и, следовательно, в этих контактах разные коэффициенты восстановления. Положим, что эмпирические коэффициенты A, B, C постоянны, а влажность зерна ϕ фиксирована.

Обозначим коэффициенты восстановления при контактах с биллом k и пластиной k_2 :

$$\begin{cases} k = A - Bv - C\phi; \\ k_2 = A - Bu - C\phi. \end{cases} \quad (9)$$

Во второе уравнение системы подставим формулу (5) и коэффициент A , выраженный из первого уравнения. Выполнив преобразования, получим:

$$k_2 = k(1 - Bv). \quad (10)$$

Введем обозначение: $\delta = 1 - Bv$, тогда

$$k_2 = \delta k. \quad (11)$$

Определим потери кинетической энергии $\Delta T_{\text{п}}$ при контакте с пластиной, для чего преобразуем выражение (7) с учетом формул (5) и (11):

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{п}} &= (1 - k_2^2) \frac{mu^2}{2} = (1 - \delta^2 k^2) \frac{mu^2}{2} = \\ &= (1 - \delta^2 k^2) \frac{m}{2} (1 + k)^2 v^2 = \\ &= \frac{mv^2}{2} (1 - \delta^2 k^2) (1 + 2k + k^2); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2} (1 + 2k + (1 - \delta^2)k^2 - 2\delta^2 k^3 - \delta^2 k^4). \quad (13)$$

Теперь найдем общие потери кинетической энергии ΔT при взаимодействии частицы с ударно-отражательной парой. Для этого сложим выражения (3) и (13) и после преобразований получим:

³Зверев С.В. Зверева Н.С. Физические свойства зерна и продуктов его переработки: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 260601 (170600) "Машины и аппараты пищевых производств" направления подготовки дипломированного специалиста 260600 (655800) "Пищевая инженерия". ООО "ДеЛи принт", 2007. 175 с.

⁴Совершенствование процесса измельчения компонентов комбикормов / Л.А. Глебов и др. М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродукта СССР, 1988. 51 с.

$$\Delta T = mv^2 \left(1 + k - \frac{\delta^2 k^2}{2} - \delta^2 k^3 - \frac{\delta^2 k^4}{2} \right). \quad (14)$$

Затраты энергии, необходимые для реализации контактов частицы с рабочими органами ударно-отражательной пары, равны затратам механической энергии ротора при взаимодействии била и частицы. После удара энергия ротора уменьшается на величину W , равную сумме потерь кинетической энергии при ударе била ΔT_6 и изменения кинетической энергии ΔE частицы:

$$W = \Delta T_6 + \Delta E. \quad (15)$$

До контакта с билем скорость частицы незначительна, примем ее равной нулю. Тогда изменение кинетической энергии равно кинетической энергии, приобретенной частицей сразу после удара:

$$\Delta E = \frac{mv^2}{2}. \quad (16)$$

С учетом выражения (5) последняя формула примет вид:

$$\Delta E = \frac{mv^2}{2} (1 + k)^2. \quad (17)$$

Подставим в формулу (15) выражения (3) и (17) и, выполнив необходимые преобразования, получим окончательное выражение, определяющее затраты энергии, связанные с процессом реализации измельчения сырья в ударно-отражательной паре:

$$W = mv^2 (1 + k). \quad (18)$$

Введем понятие коэффициента поглощения энергии (КПЭ) как величину, равную отношению общих потерь кинетической энергии при ударных воздействиях к затратам энергии на их реализацию, и обозначим γ . Значение КПЭ показывает долю от затраченной механической энергии, которая преобразовалась в другие виды энергии, связанные в том числе с разрушением частиц. Соответственно, для ударно-отражательной пары γ находится, как отношение ΔT к W :

$$\gamma = \frac{\Delta T}{W}. \quad (19)$$

С учетом формул (14) и (18) выражение γ для ударно-отражательной пары примет вид:

$$\gamma = \frac{\left(1 + k - \frac{\delta^2 k^2}{2} - \delta^2 k^3 - \frac{\delta^2 k^4}{2} \right)}{(1 + k)}. \quad (20)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Соотношение (14) позволяет выполнить анализ зависимости общих потерь кинетической энергии от коэффициента восстановления при взаимодействии сырья с ударно-отражательной парой $\Delta T(k)$. На рис. 2 представлены теоретические графики $\Delta T(k)$, построенные при различных значениях скорости била (30, 40, 50 м/с) в расчете на единицу массы сырья ($m = 1$ кг). Наличие экстремумов свидетельствует о том, что при определенных значениях коэффициента восстановления k общие потери кинетической энергии будут максимальны для данной скорости била. Однако коэффициент восстановления является функцией скорости [см. выражение (8)], поэтому для данной скорости соответствует определенный коэффициент восстановления, определяющий значение общих потерь энергии (на графиках отмечены точками), и он не соответствует максимуму кривой $\Delta T(k)$.

Выражение (18) позволяет определить энергетические затраты, связанные с про-

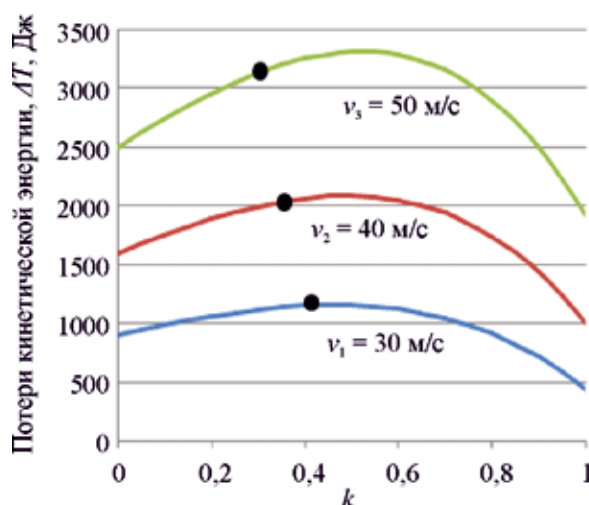


Рис. 2. Графики зависимостей общих потерь кинетической энергии $\Delta T(k)$ при взаимодействии сырья с ударно-отражательной парой

Fig. 2. Graphs of dependences of the total losses of kinetic energy $\Delta T(k)$ during the interaction of raw materials with an impact-reflective pair

цессом измельчения сырья, а КПЭ [см. выражение (19)] показывает, насколько эффективно при этом используется затраченная энергия. Понятие КПЭ можно использовать в качестве критерия для сравнения эффективности работы устройств, осуществляющих измельчение ударным способом.

Известно, что разрушение сырья ударными воздействиями осуществляется также и в центробежных дробилках, но по сравнению с роторными измельчителями они характеризуются низкими показателями потребления энергии⁵ [12]. Определим КПЭ для центробежной дробилки и сравним его с КПЭ ударно-отражательной пары. В центробежной дробилке частицы сырья ускоряются разгонным диском и отбрасываются на неподвижные отбойные элементы, где разрушаются от удара. Пусть контакты частиц с поверхностями отбойных элементов происходят под прямым углом. Тогда потери кинетической энергии определяются выражением

$$\Delta T_{\text{уд}} = (1 - k^2) \frac{mv^2}{2}, \quad (21)$$

где m – соответственно масса, кг; v – скорость частицы (м/с), разогнанной диском.

Затраты энергии для реализации удара в центробежной дробилке складываются из сообщенной частицы кинетической энергии и работы по преодолению трения частицы на лопатке разгонного диска:

$$W_{\text{уд}} = \frac{mv^2}{2} + A. \quad (22)$$

Если не учитывать трение на лопатке, то работа по преодолению трения равна нулю ($A = 0$) и выражение КПЭ для центробежной дробилки примет вид:

$$\gamma_{\text{уд}} = \frac{\Delta T_{\text{уд}}}{W_{\text{уд}}} = 1 - k^2. \quad (23)$$

Анализ выражений (20) и (23) показал, что для всех возможных значений коэффициента восстановления $k \in [0, 1]$ справедливо неравенство

$$\gamma \geq \gamma_{\text{уд}}. \quad (24)$$

Следовательно, ударно-отражательная

пара затрачивает механическую энергию эффективнее, чем центробежная дробилка даже без учета трения в последней. Графики зависимостей КПЭ ударно-отражательной пары при различных скоростях била (кривые 1, 2, 3) находятся близко друг от друга (см. рис. 3). Это означает, что эффективность работы ударно-отражательной пары не зависит от режима работы. При $k = 0$ (неупругие удары) КПЭ ударно-отражательной пары и центробежного измельчителя без трения на лопатках (кривая 4) равны максимально возможному значению – единице. С ростом k от 0 до 1 КПЭ как центробежной дробилки, так и ударно-отражательной пары, монотонно уменьшаются. КПЭ центробежной дробилки, в которой учитываются затраты на трение, будет, очевидно, меньше, чем у дробилки без трения при любом значении k (кривая 5).

Подставив формулу (8) в выражения (20) и (23), можно получить соответствующие зависимости КПЭ от скорости: для ударно-отражательной пары $\gamma(v)$ и центробежной дробилки $\gamma_{\text{уд}}(v)$ без трения. Выражения функций $\gamma(v)$ и $\gamma_{\text{уд}}(v)$ здесь не приводятся из-за их величины, но представлены их теоретические графики (см. рис. 4). Они показывают правильность соотношения

$$\gamma(v) \geq \gamma_{\text{уд}}(v) \quad (25)$$

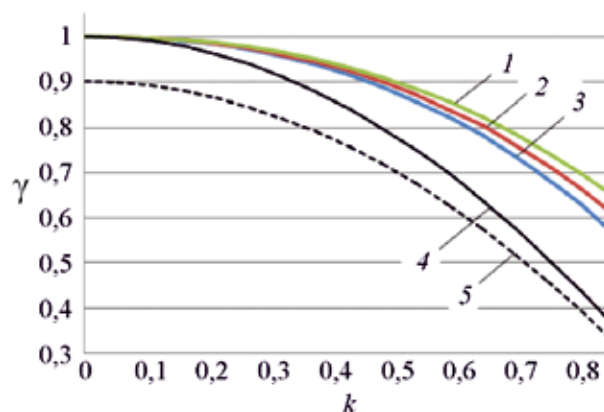


Рис. 3. Графики зависимостей $\gamma(k)$ ударно-отражательной пары (1 – 30 м/с, 2 – 40 м/с, 3 – 50 м/с) и центробежной дробилки $\gamma_{\text{уд}}(k)$ (4, 5)

Fig. 3. Graphs of dependences $\gamma(k)$ of an impact-reflector pair (1 – 30 m/s, 2 – 40 m/s, 3 – 50 m/s) and a centrifugal crusher $\gamma_{\text{уд}}(k)$ (4, 5)

⁵Золотарев С.В. Ударно-центробежные измельчители фуражного зерна (основы теории и расчета). Барнаул: ГИПП «Алтай», 2001. 200 с.

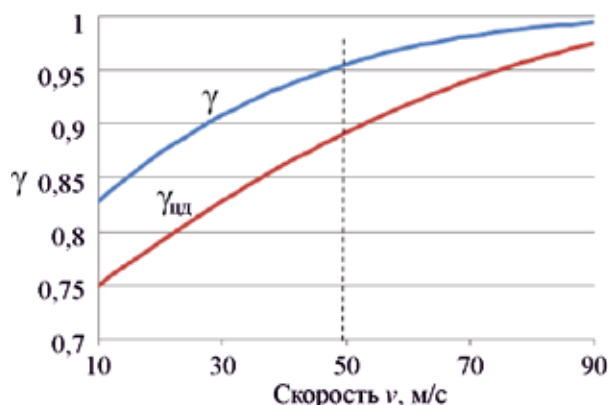


Рис. 4. Графики зависимостей КПЭ для ударно-отражательной пары $\gamma(v)$ и для центробежной дробилки $\gamma_{цд}(v)$ без учета трения

Fig. 4. Graphs of dependences of the energy absorption coefficient for the impact-reflective pair $\gamma(v)$ and for the centrifugal crusher $\gamma_{цд}(v)$ without friction

для любых значений скоростей, реализуемых на практике. Например, расчеты, выполненные при скорости била $v = 50$ м/с, показали, что различие между $\gamma(v)$ и $\gamma_{цд}(v)$ составляет около 0,07 (7%). Но с учетом трения кривая $\gamma_{цд}(v)$ окажется гораздо ниже $\gamma(v)$, а разница между $\gamma(v)$ и $\gamma_{цд}(v)$ станет существенной. Следует отметить, что ударно-отражательная пара противопоставляется такой центробежной дробилке, в которой скорость столкновения частиц с отбойными элементами равна скорости движения била ударно-отражательной пары. В расчетах и графиках (см. рис. 2–4) положены эмпирические коэффициенты (см. сноску 3): $A = 0,66$; $B = 0,0043$; $C = 0,009$ для ячменя при влажности $\varphi = 13\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найдено аналитическое выражение для определения энергетических затрат, связанных с измельчением сырья в рабочей зоне ударно-отражательной пары предлагаемого измельчителя. Введен критерий, характеризующий эффективность устройства в затратах энергии для разрушения сырья ударными воздействиями. На основе данного критерия показано преимущество предлагаемого измельчителя в энергоэффективности по сравнению с центробежными дробилками, которые, как правило, характеризуются низкими значениями потребляемой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Искендеров Р.Р., Лебедев А.Т. Молотковые дробилки: достоинства и недостатки // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 1 (17). С. 27–30.
2. Баранов Н.Ф., Фарафонов В.Г., Лопатин Л.А. Исследование взаимодействия частиц с рабочими органами молотковой дробилки // Пермский аграрный вестник. 2018. № 3 (23). С. 4–11.
3. Созонтов А.В., Лопатин Л.А. Исследование и оптимизация рабочего процесса дробилки зерна ударного действия // Вестник НГИЭИ. 2018. № 6 (85). С. 27–36.
4. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Миронов К.Е. Исследование взаимодействия зерна с лопастями ротора дробилки закрытого типа // Вестник НГИЭИ. 2017. № 8 (75). С. 26–34.
5. Zhao X., Zhou H., Rong S. Research on the New Combined Type Crusher Hammer // International Conference on Advanced Engineering Materials and Architecture Science. 2014. Vol. 488–489. P. 1160–1164.
6. Ushakov Y., Shakhov V., Asmankin E., Naumov D. Theoretical study results of product flow management process in hammer-type shredder working chamber // Engineering for Rural Development. 2019. P. 185–191. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N231.
7. Федоренко И.Я., Смышляев А.А., Левин А.М. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2002. № 11. С. 31–32.
8. Якименко А.В., Вараксин А.В. О коэффициенте полезного действия измельчителей зерна // Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 6. С. 17–18.
9. Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Абдюкаева А.Ф., Наумов Д.В. Кинематические и динамические аспекты взаимодействия ингредиентных частиц с функциональными элементами рабочей камеры измельчителя зернового материала // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (65). С. 87–89.
10. Асманкин Е.М., Петров А.А., Абдюкаева А.Ф., Наумов Д.В., Фёдоров А.Н. Пути развития машин для измельчения зерновой массы // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (64). С. 79–81.
11. Кукаев Х.С., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Шахов В.А., Абдюкаева А.Ф. Энергосберегающий способ ударного измельчения зерновых материалов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (89). С. 162–166. DOI: 10.37670/2073-0853-2021-89-3-162-166.

12. Труфанов В.В., Опрышко В.М., Ляпин В.В. Центробежный измельчитель // Сельский механизатор. 2008. № 4. С. 40.

REFERENCES

1. Iskenderov R.R., Lebedev A.T. Hammer crushers: advantages and disadvantages. *Vestnik APK Stavropol'ya = Agricultural Bulletin of Stavropol Region*, 2015, no. 1 (17), pp. 27–30. (In Russian).
2. Baranov N.F., Farafonov V.G., Lopatin L.A. Investigation of particle interaction with the working bodies of a hammer mill. *Permskii agrarnyi vestnik = Perm Agrarian Journal*, 2018, no. 3 (23), pp. 4–11. (In Russian).
3. Sozontov A.V., Lopatin L.A. Investigation and optimization of the working process of the crusher grain percussion. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*, 2018, no. 6 (85), pp. 27–36. (In Russian).
4. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Mironov K.E. Investigation of grain interaction with rotor of rotary closed type crusher. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*, 2017, no. 8 (75), pp. 26–34. (In Russian).
5. Zhao X., Zhou H., Rong S. Research on the New Combined Type Crusher Hammer // International Conference on Advanced Engineering Materials and Architecture Science, 2014, vol. 488–489. pp. 1160–1164.
6. Ushakov Y., Shakhov V., Asmankin E., Naumov D. Theoretical study results of product flow management process in hammer-type shredder working chamber. *Engineering for Rural Development*, 2019, pp. 185–191. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N231.
7. Fedorenko I.Ya., Smyshlyaev A.A., Levin A.M. Energy ratios in impact grinding of grain. *Mekha-*

nizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva = Mechanization and Electrification of Agriculture, 2002, no 11, pp. 31–32. (In Russian).

8. Yakimenko A.V., Varaksin A.V. About efficiency of grain crushing. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve = Agricultural machinery*, 2007, no. 6, pp. 17–18. (In Russian).
9. Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Abdyukaeva A.F., Naumov D.V. Kinematic and dynamic aspects of ingredient particles interaction with functional elements of the grain mill working chamber. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2017, no. 3 (65), pp. 87–89. (In Russian).
10. Asmankin E.M., Petrov A.A., Abdyukaeva A.F., Naumov D.V., Fedorov A.N. Ways of improvement the machines for grain mass grinding. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2017. no. 2 (64), pp. 79–81. (In Russian).
11. Kukaev Kh.S., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Shakhov V.A., Abdyukaeva A.F. Energy-saving method of impact milling for cereals. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2021, no. 3 (89), pp. 162–166. (In Russian). DOI 10.37670/2073-0853-2021-89-3-162-166.
12. Trufanov V.V., Opryshko V.M., Lyapin V.V. Centrifugal grinder. *Sel'skii mekhanizator = Selskiy Mechanizator*, 2008, no. 4, p. 40. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ Кукаев Х.С., аспирант; адрес для переписки: 460014, Россия, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, д. 18; e-mail: kxamza@mail.ru

Асманкин Е.М., доктор технических наук, профессор

Ушаков Ю.А., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

Абдюкаева А.Ф., кандидат технических наук, доцент

Наумов Д.В., кандидат технических наук, доцент

AUTHOR INFORMATION

✉ Khamza S. Kukaev, Postgraduate Student; address: 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia; e-mail: kxamza@mail.ru

Evgeny M. Asmankin, Doctor of Science in Engineering, Professor

Yuriy A. Ushakov, Doctor of Science in Engineering, Professor, Department Head

Alfiya F. Abdyukaeva, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor

Denis V. Naumov, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor

Дата поступления статьи / Received by the editors 25.05.2022
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 08.09.2022
Дата публикации / Published 27.12.2022