

УДК 664.73.05

Спорняк В. Г.,
к.т.н. Левченко Э. П.,
к.т.н. Левченко О. А.,
Карпук И. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЖУЩЕ-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Выполнены расчёты основных параметров вертикального двухступенчатого измельчителя режуще-ударного действия. Определены мощности на отдельных технологических этапах обработки исходного сырья и сделана интегральная оценка суммарной мощности измельчительной машины в целом. Проведена оценка удельной энергоёмкости сравниваемых измельчителей.

Ключевые слова: вертикальный режуще-ударный измельчитель, резание, удар, мощность, аналитический расчёт.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из главных направлений повышения эффективности работы дробильно-измельчительных машин является комбинирование в рабочей камере различных условий наложения нагрузки на материал, рационально учитывающих физико-механические свойства исходного сырья в зависимости от его размеров и состояния.

Недостатком имеющихся конструкций подобных измельчителей [1, 2] всё ещё являются повышенная энерго- и металлоёмкость, а также низкая производительность, обусловленная недостаточной пропускной способностью и относительно значимыми затратами ручного труда.

Поэтому актуальным направлением является разработка и создание дробильно-измельчительных машин максимально компактного исполнения и металлоёмкости, обладающих наравне со сравнительно малыми энергозатратами высокой удельной производительностью, что рационально обосновывается вертикальной компоновочной схемой, обеспечивающей отсутствие дополнительных сопротивлений движению измельчаемого материала при его транспортировании на разных технологических этапах работы машины.

Постановка задачи. Задачей исследований является повышение эффективности работы двухступенчатого вертикального

измельчителя режуще-ударного действия за счёт создания преимущественных условий режущего и ударного разрушения материала на различных стадиях его фрагментирования по высоте рабочей камеры.

В зависимости от интегральной оценки затрат энергии при резании и ударном измельчении, а также обеспечения выгрузки готового продукта определяется необходимая суммарная мощность требуемого электродвигателя, удовлетворяющая поставленным условиям компоновочной схемы.

Изложение материала и его результаты. Аналитический обзор существующих источников информации по данному направлению выявил, что для гарантированного обеспечения необходимого гранулометрического состава готового продукта измельчительные машины подобного типа снабжаются решетчатой или зубчатой деккой, а также ситовой решёткой, что приводит к лишним энергозатратам на преодоление их действия вследствие взаимного контакта с перерабатываемым сырьём, к дополнительному расходу электроэнергии. Кроме того, зачастую для выгрузки полученной массы применяются дополнительные устройства, например выгрузочные шнеки, что также не способствует снижению удельных энергозатрат и металлоёмкости данных машин в целом.

А необходимость применения при обслуживании ручного труда в негативной мере сказывается как на эффективности работы, так и на производительности.

Основными отличительными особенностями предложенного измельчителя [3] являются новизна и эффективность его компоновочной схемы и кинематики движения рабочих органов (рис. 1).

При работе измельчителя исходный продукт подаётся через загрузочную горловину 1 на первую ступень измельчения за счёт резания ножами 3, закреплёнными на диске 4, при этом происходит предварительное разрушение материала на отдельные фрагменты. В дальнейшем предварительно полученные частицы поступают на вторую ступень измельчения в зону действия молоткового барабана 5, где окончательно измельчаются, оседают вниз

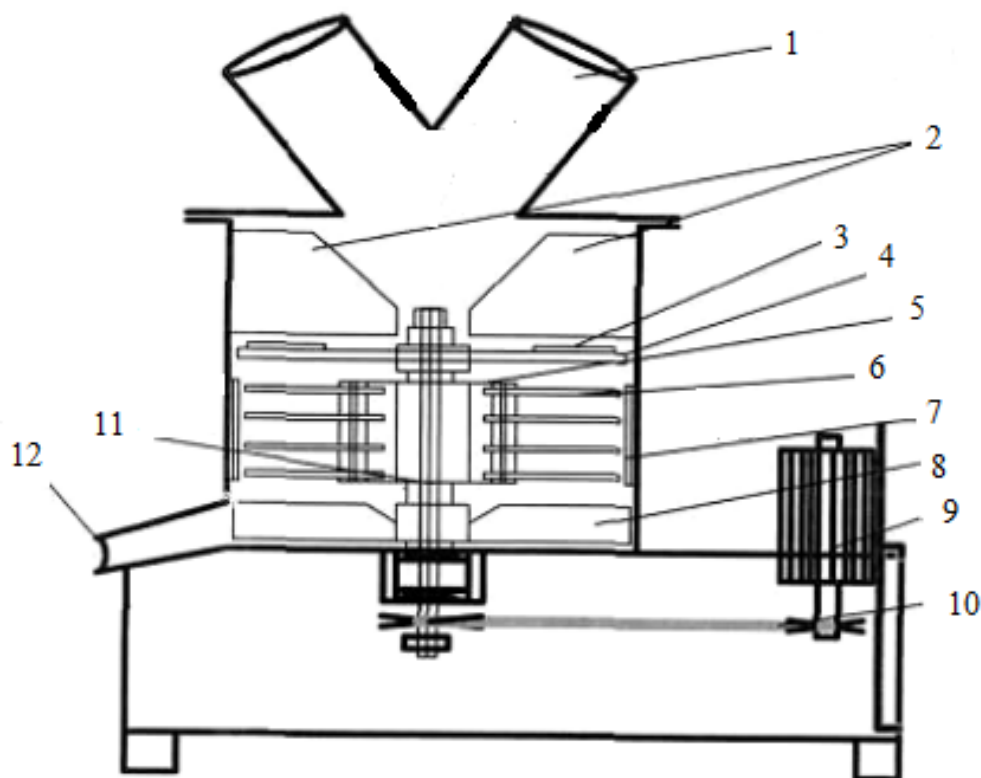
рабочей камеры и выбрасываются из неё швырялкой 8 через разгрузочное приспособление 12.

Для подтверждения повышения производительности и снижения энергозатрат был проведён теоретический расчёт энергоёмкости процесса измельчения початков кукурузы.

Расчёт энергии резания E_0 (режущая пара, диск с ножами и противорез) проводился на основе данных эксперимента на маятниковом копре [1–3].

Принимаем $E_0 = 5,3$ Дж, средний диаметр початка кукурузы $d = 0,04$ м. При средней высоте одного резания $h_{cp} = 0,006$ м рассчитываем объём массы, снятой за один проход ножа:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h_{cp}. \quad (1)$$



1 — загрузочная горловина; 2 — противорезы; 3 — ножи; 4 — диск; 5 — молотковый барабан; 6 — диски; 7 — дека; 8 — швырялка; 9 — электродвигатель; 10 — клиноременная передача; 11 — вертикальный вал; 12 — разгрузочное приспособление

Рисунок 1 Компоновочная схема двухступенчатого режуще-ударного измельчителя

Энергия, приходящаяся на 1 м³ резаного материала:

$$E_v = \frac{E_0}{V}, \quad (2)$$

где E_0 — энергия резания; V — объём материала.

Принимая среднюю плотность початков кукурузы $\rho = 600$ кг/м³, получим энергию на 1 кг сырья:

$$E' = \frac{E_v}{\rho}. \quad (3)$$

При производительности $Q = 1000$ кг/ч = 0,27 кг/с мощность, затрачиваемая на резание, будет равна

$$N_{рез} = E' \cdot Q. \quad (4)$$

При ударе с начальной скоростью V_0 , за время dt материал деформируется на величину d_x :

$$d_x = V_0 \cdot dt. \quad (5)$$

Общая длина участка, участвующая в деформации, равна

$$dl = c \cdot dt, \quad (6)$$

где c — скорость звука в упругой среде.

При этом относительная деформация

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{d_x}{dl} = \frac{V_0 \cdot dt}{c \cdot dt} = \frac{V_0}{c}. \quad (7)$$

Скорость звука в упругой среде находится по формуле

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (8)$$

где E — модуль упругости; ρ — плотность материала.

При упругой деформации

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{SE}, \quad (9)$$

где $\frac{\Delta l}{l}$ — относительное удлинение;

Δl — удлинение; l — длина образца; F — усилие; S — площадь образца.

При этом напряжение (кгс/м²) будет равно

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (9) в (10), получим

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} \cdot E = \frac{V_0 \cdot E}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} = V_0 \cdot \sqrt{\rho \cdot E}. \quad (11)$$

Отсюда

$$V_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho \cdot E}}. \quad (12)$$

Из условия разрушения, когда кинетическая энергия равна максимальной потенциальной энергии упругой деформации

$$\frac{K \cdot \Delta X^2}{2} = \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (13)$$

где K — коэффициент упругости; ΔX — удлинение.

Коэффициент упругости:

$$K = \frac{F}{\Delta l} = l \cdot S \cdot E. \quad (14)$$

Исходя из уравнений (13) и (14), максимальное напряжение

$$F_{\max} = K \cdot \Delta X. \quad (15)$$

Отсюда

$$F_{\max} = \sigma_{\max} \cdot S. \quad (16)$$

Подставляя в уравнение (15) плотность ρ и начальную скорость V , получим

$$\sigma_{\max} \cdot S \cdot \Delta X = \rho \cdot S' \cdot l \cdot V^2, \quad (17)$$

где S' — сечение образца.

Отсюда

$$\sigma_{\max} \cdot \frac{\Delta X}{l} = \rho \cdot V^2. \quad (18)$$

Так как из уравнения (18)

$$\frac{\Delta X}{l} = \frac{\sigma_{\max}}{E}, \quad (19)$$

то соотнося уравнения (18) и (19), получаем

$$\frac{\sigma_{\max}^2}{E} = \rho \cdot V^2. \quad (20)$$

Исходя из уравнения (20), выражение для начальной скорости

$$V^2 = \frac{\sigma^2}{\rho \cdot E}, \quad (21)$$

или

$$V_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho \cdot E}}, \quad (22)$$

что соответствует предыдущим результатам.

Далее ведём расчёт минимального расстояния от оси вращения, где будет выполняться условие разрушения:

$$V_0 = \omega \cdot r, \quad (23)$$

где ω — угловая скорость вращения барабана; r — расстояние от оси вращения.

Отсюда находится радиус вращения:

$$r = \frac{V_0}{\omega}. \quad (24)$$

Затрачиваемая барабаном мощность находится по формуле

$$N_{\text{бар}} = \frac{Q \cdot V^2}{2} = \frac{Q \cdot \sigma^2}{\rho \cdot E}. \quad (25)$$

При выходе готовой массы из дробилки во вращающейся системе отсчёта действуют следующие силы.

Центробежная сила инерции:

$$F_{\text{ц}} = m \cdot \omega^2 \cdot x. \quad (26)$$

Сила нормального давления:

$$F_{\text{н}} = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot V \cdot \sin \alpha. \quad (27)$$

Кориолисова сила инерции:

$$V_k = 2 \cdot \left[\overset{-}{\omega} \cdot \overset{-}{V_{om}} \right] \cdot \sin \alpha,$$

где $\sin \alpha = 1$.

При этом

$$F \cdot t = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot V_{om} \cdot f. \quad (28)$$

Силой тяжести можно пренебречь, т. к. $\omega^2 x \gg g$.

Получим уравнение относительного движения:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = m \cdot \omega^2 \cdot x - 2 \cdot m \cdot \omega \cdot f \cdot V_{om}. \quad (29)$$

Так как $V_{om} = \frac{dx}{dt}$, то, подставляя в уравнение (29), получаем

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot f \cdot \frac{dx}{dt} - m \cdot \omega^2 \cdot x = 0. \quad (30)$$

После сокращения массы

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \frac{dx}{dt} - \omega^2 \cdot x = 0. \quad (31)$$

Характеристическое уравнение находится в виде

$$\kappa^2 + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \kappa - \omega^2 = 0, \quad (32)$$

откуда

$$\begin{aligned} \kappa &= -\omega \cdot f \pm \sqrt{f^2 \cdot \omega^2 + \omega^2} = \\ &= -\omega \cdot \left(f \pm \sqrt{1 + f^2} \right). \end{aligned} \quad (33)$$

Исходя из этого, расстояние от оси вращения

$$x = c_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot e^{k_2 \cdot t}. \quad (34)$$

Согласно [7–9] $f = 0,57$, тогда

$$\sqrt{1 + f^2} = \sqrt{1 + 0,57^2} = 1,15, \quad (35)$$

$$f - \sqrt{1 + f^2} = 0,57 - 1,15 = -0,58, \quad (36)$$

$$f + \sqrt{1 + f^2} = 0,57 + 1,15 = 1,72. \quad (37)$$

При угловой скорости вращения ротора $\omega = 314$ (3000 об/мин)

$$K_1 = 180; K_2 = -540.$$

$$x = c_1 \cdot e^{180t} + c_2 \cdot e^{-540t}. \quad (38)$$

При $t = 0$, $x = \frac{R}{2} = 0,09$ м, $V_o = 0$.

$$V = 180 \cdot c_1 \cdot e^{180 \cdot t} - 540 \cdot c_2 \cdot e^{-540 \cdot t}. \quad (39)$$

$$C_1 + C_2 = 0,09; \quad 180 \cdot c_1 - 540 \cdot c_2 = 0;$$

$$C_1 = \frac{540}{180} \cdot C_2 = 3 \cdot C_2; \quad 4 \cdot C_2 = 0,09;$$

$$C_2 = \frac{0,09}{4} = 0,0225; \quad C_1 = 0,0675.$$

$$V = 0,067 \cdot e^{180 \cdot t} - 0,025 \cdot c_2 \cdot e^{-540 \cdot t}. \quad (40)$$

$$\text{При периоде } T = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с;}$$

$$t = 0,01 \text{ с; } x = 0,0675 \cdot t^{1,8} + 0,00225 \cdot t^{-5,4} \text{ м;}$$

$$t = 0,005 \text{ с; } x = 0,0675 \cdot t^{0,90} + 0,0225 \cdot t^{-2,7} \text{ м.}$$

При расстоянии $x = 0,181$ м

$$t = \frac{\ln \frac{0,181}{0,0675}}{180} = 0,0054 \text{ с;}$$

$$V_{on} = 180 \cdot 0,0675 \cdot t^{180 \cdot 0,0054} - 540 \cdot 0,0225 \cdot t^{-540 \cdot 0,0054}. \quad (41)$$

Таким образом, минимальную скорость выхода готового продукта из разгрузочного устройства принимаем $V_o = 32$ м/с.

Расчёт угла наклона выгрузной горловины по отношению к движению материала

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_{on}}{V_{onp}}. \quad (43)$$

Принимаем $\alpha = 30^\circ$.

Скорость составит

$$V = \sqrt{V_{cn}^2 + V_{onp}^2}. \quad (44)$$

Мощность швырялки

$$N_{шв} = \frac{Q \cdot V^2}{2}. \quad (45)$$

Схема сил, действующих на частицу материала, находящуюся на лопасти швырялки приведена на рисунке 2.

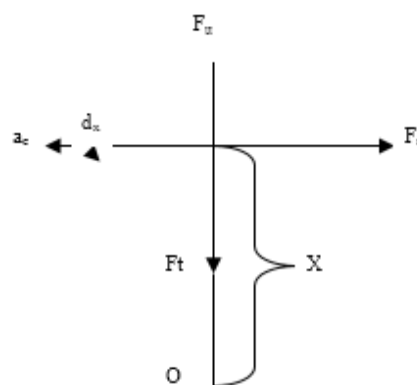


Рисунок 2 Схема сил, действующих на частицу, находящуюся на лопасти швырялки

Суммарная мощность на всех этапах процесса

$$N = N_{рез} + N_{бар} + N_{шв}. \quad (46)$$

Принимаем $N = 3$ кВт.

По сравнению с другими измельчителями типа КДУ-2,0, ДЗГ-Т-350×63-1, ИУ-Ф-10 удельная энергоёмкость предлагаемой конструкции машины является значительно меньшей (табл. 1).

Таблица 1

Удельная энергоёмкость сравниваемых измельчителей

| Модели измельчителей | Производительность, кг/ч | Мощность, кВт | Удельная энергоёмкость, кВт/кг |
|----------------------|--------------------------|---------------|--------------------------------|
| ДЗГ-Т-350×63-1 | 300 | 1,5 | 0,005 |
| ИУ-Ф-10 | 2500 | 37,0 | 0,015 |
| КДУ-2,0 | 2000 | 30 | 0,015 |
| Проектируемая модель | 1000 | 3 | 0,003 |

В результате выполненных теоретических исследований установлено, что преимущества при разрушении початков кукурузы принадлежат проектируемой конструкции, реализация которой может быть заложена при проектировании экспериментального и опытного образцов универсального измельчителя для проведения исследований в типовых производственных условиях.

Выводы и направление дальнейших исследований. Проведённые расчёты позволяют определить рациональную окружную скорость резания сырья, составляющую $V_0 = 50$ м/с; минимальное рас-

стояние от оси вращения, где будет осуществляться ударное разрушение частиц материала $r = 0,159$ м; минимальную скорость выхода готовой массы из разгрузочного устройства в пределах $V_{оп} = 32$ м/с; угол наклона разгрузочной горловины по отношению к движению материала, составляющий 30 градусов.

Определены затраты мощности на всех этапах процесса переработки сырья: на процесс резания $N_{рез} = 316$ Вт; на процесс ударного разрушения $N_{бар} = 1710$ Вт; на процесс выгрузки $N_{ув} = 570$ Вт. Общие затраты мощности составляют $N_{общ} = 2596$ Вт.

Библиографический список

1. Ялпачик, Ф. Е. Кормодробилки : конструкция и расчёт [Текст] / Ф. Е. Ялпачик, Г. С. Ялпачик, Н. Л. Крыжачковский и др. — Запорожье : Коммунар, 1992. — 292 с.
2. Пат. 28308А Украина, МКИ А 01F29/10, В 02С18/22. Малогабаритный универсальный фермерский измельчитель-смеситель кормов / В. И. Шаповалов, С. Ф. Вольвак, З. У. Болотошвили ; заявл. 21.05.96 ; опубл. 16.10.00, Бюл. № 5. — 3 с.
3. Декларационный патент № 16438 Украина, МКИ В 02 С 13/14. Двухступенчатый измельчитель кочанов кукурузы / Н. В. Брагинец, В. Г. Спорняк. — № и200600693 ; заявл. 26.01.06 ; опубл. 01.08.06, Бюл. № 8. — 3 с.
4. Брагинец, Н. В. Экспериментальные исследования ножей разных типов на маятниковом копре [Текст] / Н. В. Брагинец, В. Г. Спорняк, Ф. Г. Спорняк // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. — Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2005. — № 49/72. — С. 87–92.
5. Брагинец, Н. В. Обоснование и выбор конструктивно-технологической схемы измельчителей початков кукурузы для малых ферм [Текст] / Н. В. Брагинец, С. Ф. Вольвак, В. Г. Спорняк // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. — Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2004. — № 42/54. — С. 38–44.
6. Голик, М. Г. Хранение и обработка початков и зерна кукурузы [Текст] : учебное пособие технологических специальностей вузов пищевой промышленности / М. Г. Голик. — М. : Колос, 1968. — 333 с.
7. Резник, Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов [Текст] / Н. Е. Резник. — М. : Машиностроение, 1975. — 311 с.
8. Овчинников, А. А. К вопросу обоснования параметров измельчителя-смесителя непрерывного действия [Текст] / А. А. Овчинников, Е. В. Сурменев, А. И. Влазнев // Механизация заготовки, приготовления и раздачи кормов. — Саратов, 1982. — С. 28–32.
9. Кононов, Б. В. Анализ процесса выгрузки кормовой смеси в измельчителе-смесителе непрерывного действия [Текст] / Б. В. Кононов, А. К. Цейтлер // Эксплуатация машин в коневодстве. — Саратов, 1985. — С. 19–23.

© Спорняк В. Г.
 © Левченко Э. П.
 © Левченко О. А.
 © Карпук И. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.

Статья поступила в редакцию 03.10.19.

Спорняк В. Г., к.т.н. Левченко Е. П., к.т.н. Левченко О. О., Карпук І. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО РІЖУЧО-УДАРНОГО ПОДРІБНЮВАЧА

Виконано розрахунки основних параметрів вертикального двохступеневого подрібнювача ріжучо-ударної дії. Визначено потужності на окремих технологічних етапах обробки вхідної сировини та зроблено інтегральну оцінку сумарної потужності здрібнювальної машини у цілому. Проведено оцінку питомої енергоємності порівнювальних подрібнювачів.

Ключові слова: вертикальний ріжучо-ударний подрібнювач, різання, удар, потужність, аналітичний розрахунок.

Sporniak V. G., PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Engineering Levchenko O. A., Karpuk I. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

SUBSTANTIATION OF THE MAIN PARAMETERS OF THE VERTICAL CUTTING AND IMPACT CRUSHER

There have been carried out calculations of the main parameters of the vertical two-stage crusher of cutting and impact action. The capacities were defined at separate technological stages of processing of initial raw materials and the integral assessment of total crusher capacity as a whole is made. The specific energy intensity of the compared crushers is assessed.

Key words: vertical cutting and impact crusher, cutting, impact, capacity, analytical calculation.