

## ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ БИОМАССЫ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ

**В.А. Войтов, д.т.н., проф., Дригуля С.В., аспирант, В.А. Бунецкий, аспирант**  
(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им.  
П. Василенко)

*Приведены основные уравнения методики расчета дезинтегратора как машины для измельчения и активации биомассы перед прессованием. Показаны затраты энергии на измельчение и их влияние на КПД машины.*

**Актуальность.** Отходы сельскохозяйственного производства, такие как солома зерновых культур, отходы подсолнечника, кукурузы, а также деревообработки используются для получения твердого топлива прессованием. Одним из показателей качества прессованных пеллет является их плотность и твердость. Для получения высоких значений плотности ( $1000 \text{ кг/м}^3$  и более) применяют энергоемкое оборудование в виде ударных или гидравлических прессов. Добиться высокого качества пеллет при незначительных энергозатратах на шнековых прессах можно тонким помолом биомассы перед прессованием.

**Анализ литературных источников.** На сегодняшний день для помола биомассы, в основном, используют молотковую дробилку. Однако, как показала практика, более тонкий помол можно получить в дезинтеграторах [1]. В дезинтеграторе для измельчения биомассы одновременно совмещаются два способа измельчения – удар и истирание. Физические основы измельчения материалов изложены в гипотезах Риттингера и В.Н. Кирпичева [2], на основании которых и выполняются расчеты энергозатрат на измельчение. Однако измельчение биомассы в дезинтеграторе [1] имеет свои специфические особенности, где измельчение за счет удара является менее эффективным, чем измельчение за счет истирания. Расход энергии при измельчении возрастает с уменьшением тонины помола, поэтому, во избежание непроизводительных затрат электроэнергии крайне важно знать ожидаемый эффект (размер частиц) после измельчения [3].

**Цель исследования** – разработать методику расчета дезинтегратора как машины для измельчения и одновременно активации биомассы перед прессованием брикетов или пеллет.

В основу разработки методики расчета дезинтегратора положим три основных уравнения, которые используются при расчете и оптимизации лопаточных машин [4, 5]: уравнение сохранения энергии; уравнение количества движения; уравнение сохранения массы.

**Уравнение сохранения энергии в машине.** Рассмотрим рабочий процесс измельчения биомассы в дезинтеграторе по двум механизмам: удар и

истирание. Будем рассматривать только установившийся рабочий процесс, при котором все параметры характеризующие режим работы машины, не изменяются с течением времени.

Пусть за время прохождения через машину единицы массы воздуха и измельчаемой биомассы на валу дезинтегратора затрачивается определенная энергия.

В соответствии с законом о сохранении энергии, энергия подведенная к выделенному объему биомассы, затрачивается на увеличение кинетической энергии, внутренней энергии и потери на трение биомассы о стенки рабочих органов внутри помольной камеры:

$$\Delta \dot{A} = \Delta W + \Delta L + \Delta A_{\delta\delta}, \quad (1)$$

где  $\Delta E$  – подведенная энергия, Н·м;

$\Delta W$  – изменение кинетической энергии биомассы, Н·м;

$\Delta L$  – изменение внутренней энергии за счет внутреннего вязкого трения частиц биомассы между собой, Н·м;

$\Delta A_{\delta\delta}$  – изменение энергии, которая связана с потерями на трение частиц биомассы о поверхности рабочих органов внутри помольной камеры.

Изменение кинетической энергии, которая расходуется на измельчение биомассы за счет удара, определим из равенства, полученного на основе формулы [2]:

$$\Delta W = \frac{\sigma^2 V (z - 1)}{2E} = \frac{mU^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – предел прочности измельчаемого материала, т.е. биомассы, Па;

$V$  – объем измельчаемого материала, м<sup>3</sup>;

$z = d_n/d_k$  – степень измельчения, где  $d_n$  и  $d_k$  – начальный и конечный диаметры частиц, м;

$E$  – модуль упругости измельчаемого материала, Па;

$m$  – масса измельчаемого материала, кг;

$U$  – скорость частиц измельчаемого материала, м/с.

Приняв допущение, что измельчаемая частица имеет форму шара и учитывая то, что:  $V = \frac{\pi d_i^3}{6}$ , а  $m = \rho V = \rho \frac{\pi d_i^3}{6}$  из равенства (2) можно получить минимальную скорость, необходимую для измельчения частицы за счет удара:

$$U_{\delta\delta} = \sigma \sqrt{\frac{(z - 1)}{\rho E}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность измельчаемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Выражение для определения изменения кинетической энергии для одной частицы:

$$\delta W = \frac{\sigma^2 \pi d_i^3 \left( \frac{d_i}{d_e} - 1 \right)}{12 \dot{A}} = \frac{\rho \pi d_i^3 U_{\delta\delta}^2}{12}. \quad (4)$$

На основании полученного выражения (4) и с учетом объема помольной камеры можно получить выражение для полной кинетической энергии, которая затрачивается на измельчение за счет удара:

$$\Delta W = \frac{\sigma^2 \pi D_{cp} \delta l h \left( \frac{d_i}{d_e} - 1 \right)}{2 \dot{A}}, \quad (5)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр помольной камеры, м;

$l$  – ширина помольной камеры, м;

$h$  – высота помольной камеры (зазор между рабочими кольцами), м.

Из равенства (4) также можно получить формулу для определения конечного диаметра частицы материала  $d_{к\ y\delta}$ , полученного за счет удара:

$$d_{e\ \delta\ \ddot{a}} = \frac{d_i}{K_R \left( \frac{E\rho U_{\delta\ \ddot{a}}^2}{\sigma^2} + 1 \right)}, \quad (6)$$

где  $K_R \approx 0,04$  – эмпирический коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса и учитывающий непрямолинейное движение частицы при ударе за счет вихреобразования.

Изменение внутренней энергии за счет внутреннего вязкого трения частиц биомассы между собой (эффект истирания) определим на основании равенства [2]:

$$\Delta L = K_p \Delta F = K_{\delta} d_i^2 (z - 1), \quad (7)$$

где  $K_p$  – коэффициент, который учитывает особенности конструкции машины, согласно работы [2] определяется экспериментально и имеет размерность Дж/м<sup>2</sup>;

$\Delta F$  – вновь образованная поверхность при измельчении материала, м<sup>2</sup>.

Внутреннее вязкое трение частиц биомассы, по аналогии с течением жидкости [4] можно представить выражением:

$$\tau = \mu \text{grad} U_{\Sigma}, \quad (8)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига в слоях помольной среды (воздух + биомасса), Н/м<sup>2</sup>;

$\mu$  – динамическая вязкость помольной среды, Па·с;

$\text{grad} U_{\Sigma}$  – градиент скорости в помольной камере, 1/с;

$U_{\Sigma}$  – суммарная скорость, равная сумме скоростей обоих роторов, м/с.

С помощью формулы (8) можно получить значение коэффициента  $K_p$ , Дж/м<sup>2</sup>, который будет учитывать особенности конструкции в виде градиента скорости и характеристики помольной среды, такие как вязкость  $\mu$  и начальный диаметр частиц  $d_n$ :

$$\hat{E}_{\delta} = \mu \text{grad} U_{\Sigma} \pi d_i. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7) и с учетом выражения кинетической энергии получим равенство:

$$\delta L = \frac{\mu U_{\Sigma} \pi d_i^3 (z - 1)}{h} = \frac{\rho_{\tilde{n}} \pi d_i^3 U_{\Sigma}^2}{12}, \quad (10)$$

где  $\rho_c$  – плотность помольной среды (воздух + биомасса).

Из равенства (10) можно получить выражение для определения скорости, необходимой для измельчения истиранием:

$$U_{\dot{\epsilon}\tilde{n}} = \frac{12\mu\left(\frac{d_i}{d_{\dot{\epsilon}}}-1\right)}{h\rho_{\tilde{n}}}. \quad (11)$$

На основании выражения (10) и с учетом объема помольной камеры получим формулу для определения полной кинетической энергии, которая затрачивается на измельчение за счет истирания:

$$\Delta L = 6\mu U_{\Sigma} \pi D_{\tilde{n}\delta} l \left(\frac{d_i}{d_{\dot{\epsilon}}}-1\right). \quad (12)$$

Из равенства (10) можно получить формулу для определения конечного диаметра частицы материала  $d_{к\text{ис}}$ , полученного за счет истирания:

$$d_{\dot{\epsilon}\tilde{n}} = \frac{d_i}{K_R \left(\frac{h\rho_{\tilde{n}} U_{\Sigma}}{12\mu} + 1\right)}. \quad (13)$$

Изменение энергии, которая связана с потерями на трение частиц биомассы о поверхности рабочих органов внутри помольной камеры, выразим с помощью закона трения:

$$F_{\dot{\delta}\delta} = fP_{\dot{\delta}}, \quad (14)$$

где  $F_{тр}$  – сила трения, Н;

$f$  – коэффициент трения частиц биомассы о внешнее рабочее кольцо, на основании работ [6] равен 0,2;

$P_{ц}$  – центробежная сила, которая прижимает частицу к внешнему кольцу, Н:

$$D_{\dot{\delta}} = \frac{\rho \pi d_i^3 \omega^2 R}{6} = \frac{2\rho \pi d_i^3 U^2}{6D_{\tilde{n}\delta}}. \quad (15)$$

С учетом (14) и величины объема помольной камеры полные потери на трение биомассы о рабочие поверхности внутри помольной камеры выразим зависимостью:

$$\Delta \dot{A}_{\dot{\delta}\delta} = 0,1\rho U^2 \pi D_{\tilde{n}\delta} l h. \quad (16)$$

**Уравнение количества движения.** Уравнение количества движения позволяет определить моменты, действующие на ротор дезинтегратора, а, следовательно, и потребляемую мощность.

Согласно выполненного выше анализа на рабочее колесо (ротор) дезинтегратора действует:

- момент сопротивления вращению за счет придания частицам ускорения с последующим ударом, который определяется согласно выражению (5);

- момент сопротивления вращению за счет перемешивания (внутреннего трения) частиц биомассы внутри помольной камеры, который определяется согласно выражению (12);

- момент сопротивления вращению за счет трения частиц биомассы о внутренние поверхности колец, который определяется согласно выражения (15).

Произведение момента сопротивления вращению на угловую скорость вращения  $\omega = U/R$ , 1/с позволяет получить выражения для определения потребляемой мощности.

Мощность, которая затрачивается на измельчение биомассы за счет удара, определяется выражением:

$$N_{\acute{o}\ddot{a}} = \frac{U\sigma^2\pi lh\left(\frac{d_i}{d_{\acute{e}}}-1\right)}{E}, \text{ Вт.} \quad (17)$$

С учетом, что линейная скорость ротора равна:

$$U = \frac{\pi D_{\grave{n}}\delta n}{60}, \quad (18)$$

где  $n$  – обороты ротора, об/мин, выражение для  $N_{\text{уд}}$  можно записать:

$$N_{\acute{o}\ddot{a}} = \frac{\pi^2\sigma^2 D_{\grave{n}}^2\delta n^2 l\left(\frac{d_i}{d_{\acute{e}}}-1\right)}{60E}. \quad (19)$$

Мощность, которая затрачивается на измельчение биомассы за счет истирания, определяется выражением:

$$N_{\grave{e}\grave{n}} = \frac{24\mu\pi^3 D_{\grave{n}}^2\delta n^2 l\left(\frac{d_i}{d_{\acute{e}}}-1\right)}{3600}. \quad (20)$$

Мощность, которая затрачивается на потери на трение биомассы о рабочие органы:

$$N_{\acute{o}\delta} = \frac{0,2\rho\pi^4 D_{\grave{n}}^3\delta n^3 lh}{216000}. \quad (21)$$

**Уравнение сохранения массы** в применении к потоку газа иначе называется уравнением неразрывности и в частном случае установившегося режима работы дезинтегратора означает равенство расхода воздуха и биомассы через рабочие органы, т.е через первый, второй и последующие рабочие пояса:

$$G_1 = G_2 = G_n = G = \text{const}. \quad (22)$$

При этом расход воздуха через любое поперечное сечение выражается формулой [5]:

$$G = \rho_c v_R F, \text{ кг/с,} \quad (23)$$

где  $v_R$  – радиальная скорость потока, м/с;

$F$  – площадь проходного сечения, м<sup>2</sup>.

Радиальная скорость потока равна:

$$v_R = \frac{U}{2}. \quad (24)$$

Из конструкций дезинтеграторов, а также работ [7] следует, что площадь проходного сечения определяет первый (внутренний) рабочий пояс,  $F_1$ .

С учетом уравнения сохранения массы (22) и выражения (23) можно получить расчетную формулу для определения площади проходных сечений на втором, третьем и последующих рабочих поясах:

$$F_m = \frac{\rho_{c1} D_{cp1}}{\rho_{cm} D_{cp m}} F_1, \quad (25)$$

где  $\rho_{c1}, \rho_{cm}$  – плотность помольной среды (воздух + биомасса) на первом и последующем  $m$ -поясе;

$D_{cp1}, D_{cp m}$  – средний диаметр помольной камеры первого и последующего  $m$ -пояса;

$F_1$  – площадь проходного сечения первого рабочего пояса.

Следовательно, производительность дезинтегратора можно рассчитать по формуле:

$$G_{\ddot{a}} = \frac{3600 \rho_{c1} U_1 F_1}{2} = 30 \rho_{c1} \pi D_{cp1} n F_1. \quad (26)$$

Эффективность работы дезинтегратора можно оценить эффективным КПД,  $\eta_e$ :

$$\eta_{\ddot{a}} = \eta_i \cdot \eta_N, \quad (27)$$

где  $\eta_m$  – механический КПД, который учитывает потери на трение в подшипниках шпинделя и ременной передачи привода и равен 0,92...0,96;

$\eta_N$  – мощностной КПД или внутренний КПД дезинтегратора, который учитывает потери мощности внутри машины.

Мощностной КПД можно определить по следующей зависимости:

$$\eta_N = \frac{N_{\acute{o}\ddot{a}} + N_{\grave{e}\ddot{n}}}{N_{\acute{o}\ddot{a}} + N_{\grave{e}\ddot{n}} + N_{\acute{o}\grave{d}}}. \quad (28)$$

**Выводы.** Анализ полученных теоретических зависимостей позволяет сделать следующие выводы, что мощность, затрачиваемая на измельчение биомассы посредством удара, зависит от оборотов ротора в первой степени, на измельчение за счет истирания – во второй степени. Потери на трение биомассы о рабочие органы зависят от оборотов ротора в третьей степени.

Как следует из полученных выражений плотность помольной среды  $\rho_c$  является переменной функцией внутри помольной камеры, а, следовательно, и между рабочими поясами, что ставит задачу ее определения в процессе моделирования и последующих инженерных расчетов.

## Список литературы

1. Войтов В.А., Бунецкий В.О. Дезинтегратор, UA 65059. Патент на корисну модель. МПК В02С 13/22. Опубликовано Бюл. №22, 25.11.2011.

2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / Под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Химия, 200. – 178 с.
3. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
4. Самойлович Г.С. Гидродинамика. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
5. Анипко О.Б., Миневиц А.Б., Масягин В.И. и др. Основы газодинамических процессов в авиационных газотурбинных двигателях. – Харьков: ХИВВС им. И. Кожедуба, 2003. – 148 с.
6. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Виброрешетчатая сепарация зерновых смесей. – Харьков: «Міськдрук», 2011. – 280 с.
7. Шапорев Р.Р., Семиноженко И.А., Масловская А.Н. Дезинтегратор с повышенными нагрузками на измельчаемый материал // Межвузовский сборник статей. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – с. 198-202.

## Аннотация

### **ОСНОВНІ РІВНЯННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОДРІБНЕННЯ БІОМАСИ У ДЕЗІНТЕГРАТОРІ**

В.А. Войтов, д.т.н., проф., С.В. Дригуля, аспірант, В.А. Бунецький, аспірант

*Наведено основні рівняння методики розрахунку дезінтегратора як машини для подрібнення та активації біомаси перед пресуванням. Показані витрати енергії на подрібнення і їх вплив на ККД машини.*

## Abstract

### **BASIC EQUATIONS OF MODELING CRUSHING IN BIOMASS IN DISINTEGRATOR**

V.A. Vojtov, doctor of technical sciences, professor, S.V. Drigulia, post-graduate student, V.A. Bunetskij, post-graduate student

*The basic equation calculation method disintegrator as a machine for grinding and activation of the biomass before pressing are presented. Energy consumption for grinding and their influence on the efficiency of the machine are showing.*