

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 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 ΔE – подведенная энергия, Н·м;

ΔW – изменение кинетической энергии биомассы, Н·м;

ΔL – изменение внутренней энергии за счет внутреннего вязкого трения частиц биомассы между собой, Н·м;

ΔA_{mp} – 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 σ - предел прочности измельчаемого материала, т.е. биомассы, Па;

V – объем измельчаемого материала, м³;

$z = d_n/d_k$ – 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 ρ - плотность измельчаемого материала, кг/м³.

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:

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

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:

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

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/м²;

ΔF – вновь образованная поверхность при измельчении материала, м².

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

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

где τ – напряжение сдвига в слоях помольной среды (воздух + биомасса), Н/м²;

μ – динамическая вязкость помольной среды, Па·с;

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

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

С помощью формулы (8) можно получить значение коэффициента K_p , Дж/м², который будет учитывать особенности конструкции в виде градиента скорости и характеристики помольной среды, такие как вязкость μ 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 ρ_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:

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

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:

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

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

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

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:

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

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, м².

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 ρ_{c1}, ρ_{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, η_e :

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

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

η_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 ρ_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. Опубліковано 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. Виброрешетная 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.