

УДК 621.891

**В.А.Войтов, проф., д-р техн. наук, С.В. Дригуля, асп., В.А. Бунецкий, асп.**

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко*

## Экспериментальные исследования параметров помола биомассы в дезинтеграторе

В работе приведены результаты экспериментальных исследований измельчения разных типов биомассы в дезинтеграторе. Проранжированы факторы, влияющие на суммарную мощность на измельчение, производительность дезинтегратора и средний размер частиц после помола. Установлено, что измельчение соломы наиболее энергоемкий процесс, чем измельчение отходов древесины, подсолнечника и кукурузы.

**дезинтегратор, измельчение, энергозатраты, производительность, средний размер частиц после помола**

**В.А. Войтов, С.В. Дригуля, В.О. Бунецкий**

*Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенко*

**Експериментальні дослідження параметрів помелу біомаси в дезінтеграторі**

В роботі наведено результати експериментальних досліджень подрібнення різних типів біомаси в дезінтеграторі. Проранжовано фактори, що впливають на сумарну потужність на подрібнення, продуктивність дезінтегратора і середній розмір часток після помелу. Встановлено, що подрібнення соломи найбільш енергоємний процес, ніж подрібнення відходів деревини, соняшнику та кукурудзи.

**дезінтегратор, подрібнення, енерговитрати, продуктивність, середній розмір часток після помолу**

**Актуальность.** При производстве твердого топлива из биомассы (соломы, отходов подсолнечника, кукурузы, древесины) для предварительного измельчения перед прессованием используют молотковую дробилку или другие устройства, совмещающие несколько механизмов измельчения. Для снижения энергозатрат при измельчении и одновременном повышении степени измельчения в работе [1] обосновывается применение дезинтегратора. Дезинтегратор обеспечивает влажный помол биомассы, с последующим влажным прессованием, а, следовательно, позволяет исключить сушку из технологического процесса, как наиболее энергоемкую составляющую процесса производства.

**Анализ последних публикаций по данной проблеме.** Авторами работы [2] получены основные уравнения моделирования измельчения биомассы в дезинтеграторе и выполнены теоретические исследования эффективности помола. По результатам исследований была выполнена оптимизация геометрических размеров и режимов работы дезинтегратора, которая обеспечивает максимальный КПД и минимальные затраты электроэнергии на одну тонну помола биомассы [3].

По результатам моделирования и оптимизации конструктивных параметров был получен патент на полезную модель [4] и изготовлен опытный образец дезинтегратора.

**Цель исследований** – экспериментальным путем подтвердить адекватность теоретических исследований по определению энергозатрат на помол, производительность дезинтегратора и тонкость помола.

### Методический подход в проведении исследований.

Как следует из результатов математического моделирования [2], на процесс измельчения биомассы влияет ряд независимых факторов: физико-механические характеристики помольной среды (плотность, предел прочности, модуль упругости); начальный размер частиц материала перед помолом; влажность материала; обороты ротора дезинтегратора.

В качестве материалов измельчения выступают три вида биомассы: солома зерновых культур; отходы подсолнечника и кукурузы; древесные отходы.

Данные виды материалов отличающихся между собой плотностью, пределом прочности, модулем упругости, а, следовательно, будут по-разному влиять на процесс измельчения.

Частоту вращения роторов дезинтегратора изменяли с помощью сменных шкивов. Значения частоты вращения регистрировали с помощью тахометра, предел допустимой погрешности 0,5%.

Потребляемую мощность электрическим двигателем на установившемся режиме работы дезинтегратора определяли с помощью ваттметра.

Производительность дезинтегратора определяли через скорость помольной среды на выходе из дезинтегратора:

$$G_o = A_{\min} \sqrt{1 - \left(\frac{A_{\min}}{A_{\max}}\right)^2} V_{II},$$

где  $G_o$  – производительность дезинтегратора, м<sup>3</sup>/с;

$A_{\min}$  – меньшая площадь сечения выходного патрубка дезинтегратора, м<sup>2</sup>;

$A_{\max}$  – большая площадь сечения выходного патрубка дезинтегратора, м<sup>2</sup>;

$V_{II}$  – скорость потока помольной среды на выходе из дезинтегратора, м/с.

Скорость потока на выходе из дезинтегратора определяли с помощью диффузора и U-образного водяного манометра.

Для определения тонкости помола различных видов биомассы в дезинтеграторе, а также для определения среднего размера частиц после помола применили ситовый метод определения гранулометрического состава согласно ГОСТ 2093-82.

Для проведения лабораторного анализа применяли сита с проволочными и капроновыми сетками по ГОСТ Р51568-99. Размер ячеек сит в микрометрах: 710; 500; 250; 125; 63; 45.

Биомассу с массовой долей влаги после помола, препятствующей разделению частиц перед рассевом, сушили в сушильном шкафу при температуре не выше (40±5)°С.

**Планирование и обработка результатов экспериментов.** Учитывая большое количество переменных, влияющих на процесс измельчения был выбран трехфакторный план Бокса-Бенкена, позволяющий получать одинаковую дисперсию значений функции отклика во всех равноудаленных от центра эксперимента точках.

Среди большого количества факторов, которые влияют на процесс измельчения в дезинтеграторе, частота вращения, влажность помольной среды и начальный размер частиц перед помолом, легко контролируются в процессе проведения эксперимента и, как показали предварительные опыты, имеют минимальное значение среднего квадратического отклонения.

Факторы, которые подвержены изменению в процессе эксперимента и уровни их варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исследуемые факторы и уровни варьирования

Исследуемый фактор	Ед. измерения	Обозначение	Уровни варьирования		
			-1	0	+1
Частота вращения, $n$	об/мин	$X_1$	500	1500	2500
Влажность биомассы, $Q$	%	$X_2$	15	30	45
Начальный размер частиц, $d_n$	мм	$X_3$	2	5	8

В качестве функции отклика в процессе проведения эксперимента были выбраны следующие показатели:

- суммарная мощность потребляемая двумя двигателями на установившемся режиме работы дезинтегратора –  $N_{изм}$ , кВт;

- производительность дезинтегратора на установившемся режиме работы –  $G_o$ , т/ч;

- средний размер частиц биомассы после помола –  $d_s$ , мм.

**Результаты экспериментальных исследований.** По полученным экспериментальным данным с помощью метода наименьших квадратов были получены регрессионные уравнения второго порядка.

Статистическая оценка значимости коэффициентов регрессии производилась с помощью критерия Стьюдента, а проверка на адекватность регрессионного уравнения – с помощью критерия Фишера.

Регрессионные уравнения процесса измельчения древесных отходов в дезинтеграторе в кодовых значениях имеют следующий вид.

1. Уравнение затрат суммарной мощности на измельчение:

$$N_{изм.д.} = 26,3 + 22,2X_1 - 2,03X_2 + 0,025X_3 + 0,1X_2X_3 + 0,05X_1X_3 - 0,175X_1X_2 + 0,67X_3^2 + 0,9X_2^2 + 9,05X_1^2. \quad (1)$$

2. Уравнение производительности дезинтегратора:

$$G_{o.д.} = 28,46 + 19,8X_1 + 1,31X_2 - 0,13X_3 - 0,32X_2X_3 + 0,05X_1X_3 + 0,5X_1X_2 + 0,55X_3^2 + 1,154X_2^2 + 1,77X_1^2. \quad (2)$$

3. Уравнение среднего размера частиц после помола:

$$d_{s.д.} = 0,063 - 0,046X_1 - 0,01X_2 + 0,036X_3 - 0,011X_2X_3 - 0,042X_1X_3 + 0,016X_3^2 + 0,027X_1^2. \quad (3)$$

Анализ уравнений (1) – (3) позволяет проранжировать степень влияния факторов на целевые функции отклика.

Как следует из уравнения (1) на суммарную мощность измельчения в большей степени влияют обороты ротора  $X_1$ , затем влажность помольной среды  $X_2$  и в значительно меньшей степени начальный размер частиц перед помолом  $X_3$ .

Такое влияние факторов характерно и для производительности дезинтегратора, уравнение (2).

Степень влияния факторов на средний размер частиц после помола, уравнение (3), имеет иной рейтинг. В большей степени влияют обороты ротора  $X_1$ , затем

начальный размер частиц перед помолом  $X_3$  и в последнюю очередь влияет влажность помольной среды  $X_2$ .

Расчет по регрессионным уравнениям в натуральных значениях переменных показал, что при  $n = 1500$  об/мин, влажности древесных отходов 30% и начальный размер частиц 5 мм:  $N_{изм} = 26,4$  кВт; производительность  $G_o = 28$  т/ч; средний размер частиц после помола  $d_s = 0,063$  мм, что удовлетворительно согласуется с теоретическими расчетами [2, 3].

Регрессионные уравнения процесса измельчения отходов подсолнечника и кукурузы в кодовых значениях имеют вид.

1. Уравнение затрат суммарной мощности на измельчение:

$$N_{изм.п.} = 28,4 + 22,4X_1 - 2,25X_2 + 0,05X_3 + 0,1X_2X_3 + 0,1X_1X_3 - 0,3X_1X_2 - 1,28X_3^2 - 1,13X_2^2 + 6,91X_1^2. \quad (4)$$

2. Уравнение производительности дезинтегратора:

$$G_{o.п.} = 27,43 + 19,9X_1 + 1,5X_2 - 0,025X_3 - 0,1X_2X_3 + 0,4X_1X_3 + 0,4X_1X_2 + 0,4X_3^2 + 1,4X_2^2 + 1,8X_1^2. \quad (5)$$

3. Уравнение среднего размера частиц после помола:

$$d_{s.п.} = 0,063 - 0,122X_1 - 0,02X_2 + 0,075X_3 - 0,027X_2X_3 - 0,043X_1X_3 + 0,068X_3^2 - 0,01X_2^2 + 0,099X_1^2. \quad (6)$$

Анализ уравнений (4) – (6) позволяет сделать вывод, что степень влияния факторов на затраты суммарной мощности, производительности и среднего размера частиц после помола аналогична древесных отходам. При этом, расчет по регрессионным уравнениям в натуральных значениях переменных показал, что при тех же значениях, что и у древесных отходов:  $n = 1500$  об/мин, влажность 30% и начальном размере частиц 5 мм:  $N_{изм} = 28,5$  кВт; производительность  $G_o = 27$  т/ч; средний размер частиц после помола  $d_s = 0,063$  мм.

Как следует из эксперимента помол отходов подсолнечника и кукурузы – более энергоемкий процесс, чем древесных отходов.

Регрессионные уравнения процесса измельчения соломы в кодовых значениях имеют вид.

1. Уравнение затрат суммарной мощности на измельчение:

$$N_{изм.с.} = 30,5 + 22,27X_1 - 3,11X_2 + 0,91X_3 - 1,75X_2X_3 + 0,175X_1X_3 - 0,075X_1X_2 + 0,52X_3^2 + 0,62X_2^2 + 6,95X_1^2. \quad (7)$$

2. Уравнение производительности дезинтегратора:

$$G_{o.с.} = 26,66 + 19,76X_1 + 1,08X_2 - 0,2X_3 - 0,55X_2X_3 + 0,05X_1X_3 + 0,57X_1X_2 + 0,154X_3^2 + 1,129X_2^2 + 1,57X_1^2. \quad (8)$$

3. Уравнение среднего размера частиц после помола:

$$d_{s.c.} = 0,125 - 0,08X_1 - 0,02X_2 + 0,07X_3 - 0,027X_2X_3 - 0,043X_1X_3 + 0,2X_1X_2 - 0,068X_3^2 + 0,063X_2^2 + 0,173X_1^2. \quad (9)$$

Как следует из уравнений (7) – (9) степень влияния факторов аналогичная как и у древесных отходов и отходов подсолнечника. Однако расчеты параметров дезинтегратора при одинаковых значениях оборотов, влажности и начального размера частиц показали, что:  $N_{изм} = 30,6$  кВт;  $G_o = 26,4$  т/ч;  $d_s = 0,125$  мм

#### Выводы:

1. Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что полученные расчетные зависимости, опубликованные в работах [2, 3], адекватны результатам эксперимента, а разработанная методика расчета [2, 3] может применяться для проектирования дезинтеграторов под другие типы биомасс на различную степень измельчения.

2. Экспериментальными исследованиями установлено, что измельчение соломы наиболее энергоемкий процесс по сравнению с отходами подсолнечника, кукурузы и отходов древесины. При одних и тех же энергозатратах средний размер частиц помола соломы в 2 раза больше, чем у древесных отходов и отходов подсолнечника и кукурузы.

#### Список литературы

1. Бунецький В.О. Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пеллет або брикетів / В.О. Бунецький // Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, Вісник центру наукового забезпечення АПВ Харківської області, випуск 10, 2011. – С. 328-340.
2. Войтов В.А., Дригуля С.В., Бунецький В.А. Основные уравнения моделирования измельчения биомассы в дезинтеграторе / Вісник ХНТУСГ, вип. 123. – Харків: ХНТУСГ, 2012. – С. 240-246.
3. Дригуля С.В. Оптимизация конструктивных параметров дезинтегратора для измельчения биомассы / Перспективна техніка і технології – 2012. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. – Миколаїв: МДАУ, 2012. – С. 182-186.
4. Войтов В.А., Бунецький В.О. Дезінтегратор, UA 65059. Патент на корисну модель. МПК В02С 13/22. Опубліковано Бюл. №22, 25.11.2011.
5. Войтов В.А., Дригуля С.В. Экспериментальные исследования дисперсности помола биомассы в дезинтеграторе / Вісник ХНТУСГ, вип. 136. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – С. 236-246.

#### V. Vojtov, S. Drigulia, V. Bunetskij

*Kharkov National Technical University of Agriculture them. P. Vasilenko*

#### Experimental investigations of the parameters of grinding biomass in the disintegrator

The purpose of research - experimentally confirm the adequacy of theoretical studies to determine the energy consumption for grinding, the performance of the cage and fineness.

The results of experimental studies of different types of biomass grinding in a disintegrator were presented in the paper. The factors that influence the total power reduction, performance disintegrator and the average size of the particles after grinding were ranking. Chopped straw most energy intensive than chopping wood waste, sunflower and maize was found.

Chopped straw most energy intensive than waste sunflower, corn, and wood waste. At the same energy consumption an average particle size of grinding straw is 2 times greater than that of wood waste and sunflower corn.

**disintegrator, grinding, energy costs, performance, the average size of the particles after grinding**

Получено 18.04.13