

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗРЕШІТНОЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ ДЛЯ ЛІНІЙ ТВЕРДОПАЛИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Єременко О., канд. техн. наук,
<https://orcid.org/0000-0002-3377-0015>,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Халін С., канд. екон. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-7510-5056>,
Гайдай Т., канд. техн. наук,
<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,
УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого
Саркісова М.,
<https://orcid.org/0000-0002-5462-6442>,
Данилюк О.,
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

У статті проаналізовано процеси подрібнення вторинної біомаси для виробництва пелет і брикетів, обґрунтовано вибір типу подрібнювача та визначено його параметри.

Метою роботи є дослідження методів підвищення ефективності виробництва твердих видів біопалива шляхом застосування перспективної молоткової безрешітної дробарки.

Методи. Об'єктом дослідження є технологічний процес і конструкція прямоточної молоткової безрешітної дробарки, призначеної для подрібнення рослинних матеріалів до нормативного фракційного складу для виробництва паливних гранул або брикетів. Дослідження базувалися на порівняльному аналізі ударного подрібнення, теорії удару та математичному моделюванні.

Результати. Для гранулювання чи брикетування необхідне подрібнення сировини до 0,1-5 мм. Виявлено, що традиційні решітні дробарки мають підвищені на 12-18% енерговитрати, швидкий знос і проблеми із забиванням отворів при високій вологості. Визначено, що для подрібнення твердопаливної сировини на підприємствах малої та середньої потужності найбільш ефективною є безрешітна дробарка моделі «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» з молотковим роторним механізмом. Вона усуває циркуляцію біомаси, забезпечуючи прямоточний цикл подрібнення та збільшуючи продуктивність до 18%. Оптимальна колова швидкість молотків становить не менше 60 м/с, а мінімальний радіус диску ротора – 0,2 м при 2800-3000 об/хв. Технологічний процес моделі «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» передбачає ефективне використання кінетичної енергії молотків і рециркуляцію недоподрібнених частинок, що забезпечує високу ефективність та якість кінцевої продукції. Застосування такої дробарки значно підвищує ефективність виробництва твердого біопалива.

Висновки. Дослідження технологічних процесів і конструкцій молоткових подрібнювачів виявили значні переваги прямоточних безрешітних молоткових дробарок порівняно з традиційними решітними моделями. Запропоновані теоретичні положення, зокрема методи розрахунку енергії дроблення, ударного імпульсу та динамічного моменту інерції ротора є основою для подальшого проектування та оптимізації параметрів прямоточних безрешітних дробарок.

Ключові слова: вторинна біомаса, твердопаливне виробництво, молоткові подрібнювачі, безрешітна дробарка, процес, параметри.

Вступ. Зараз мінеральне паливо, до якого відноситься нафта, природний газ, кам'яне вугілля, горючі сланці тощо залишається основою світового паливо-енергетичного комплексу. Посилення проявів парникового ефекту за останні десятиліття, як вважають спеціалісти [Мельничук та ін., 2012; Clauser et al., 2021], викликане антропогенними чинниками, зокрема викидами газів, що виникають під час спалювання надрового палива, як залишків колишньої біосфери. Нині близько 80% енергії надходить із вищезазначених видів палив.

У зв'язку з вичерпаністю та екологічною шкідливістю традиційних викопних джерел енергії все більшої значущості набуває відновлювальна енергетика, у тому числі паливо з біомаси. Для виробництва твердого біопалива застосовується вторинна біомаса, зокрема відходи лісозаготівлі та деревообробки, побічна продукція аграрних і переробних підприємств, енергетичні культури [Железна, 2020; Piskunova et al., 2022]. Паливні вироби з біомаси отримують шляхом гранулювання чи брикетування підготовленої сировини у відповідному обладнанні під тиском 40-90 МПа. Підготовчі процеси твердопаливного виробництва передбачають видалення вологи з біомаси до 10-14 % та подрібнення до стану мульчи з розмірами частинок 1-5 мм [Дубровін та ін., 2014; Gageanu et al., 2016; Єременко та ін., 2021; Piskunova et al., 2022]. Такий ступінь подрібнення рослинних матеріалів забезпечують молоткові, роторні, ножові швидкообертові подрібнювачі, а також дезінтегратори [Potapova, 2013; Devin, Tkachuk, 2015].

Постановка завдань. Для вибору перспективного типу молоткової дробарки для малих і середніх твердопаливних підприємств проведено аналітичний огляд технологічних процесів і конструкцій серійних молоткових подрібнювачів різного призначення, що набули широкого розповсюдження у сільському господарстві, комбікормовій промисловості, твердопаливній галузі. Відомі типорозміри молоткових і роторних подрібнювачів, на-

приклад, «КДУ-2», «ДМК-5», «ДМ-Ф-4», «ДБ-5», «ДЗ-Т-1», «ДЗК-1», «ИЗК-Ф-1», «ИРМ-50», «ИРТ-80», «ГТДРМ-0,7/55», «ММ-03А-С», «МК-10» тощо. Доцільність їх застосування в лініях твердопаливних виробництв для отримання подрібненої сировинної біомаси не має однозначної рекомендації.

Варто зазначити, що є більш ефективні молоткові подрібнювачі серійного виробництва для переробки рослинних матеріалів [Ревенко та ін., 2011; Yeremenko, 2020]:

- дробарки типорозміру «ГТДРМ-0,7/55» випускає інжинірингова група «ІСК Group ТМ GRANTECH» (Грантех), продуктивність - до 3 т/год, призначені для подрібнення кормових і твердопаливних матеріалів;

- дробарки моделі «ДМ-Ф-4», продуктивність - 3 т/год, призначені для остаточного подрібнення дрібних кускових відходів біомаси, кукурудзи тощо;

- млин молотковий «ММ-03А-С», продуктивність - 2 т/год, призначений для подрібнення рослинних матеріалів після збиральної техніки;

- млин молотковий «МК-10», продуктивність - 25 м³/год, призначений для подрібнення біомаси з крихкістю 2-10 (деревина, кукурудзиння, залишки соношника).

Проведений аналіз процесів і конструкцій молоткових подрібнювачів свідчить про наявність суттєвих недоліків цих засобів. Решітні (ситові) дробарки мають підвищені на 12-18 % питомі показники енерговитрат порівняно з безрешітними дробарками, які забезпечують рівномірне дроблення рослинних матеріалів завдяки багатократній ударній дії молотків у процесі проходження вторинної біомаси крізь дробильну камеру [Ревенко та ін., 2011; Potapova, 2013].

До недоліків дробарок із ситовими днищами (решітками) також варто віднести швидке зношення відбійних плит (реберних дек), забивання отворів решіток при подрібненні підвищеної понад 15 % вологості біомаси, складність монтажу і балансування ротора [Ревенко та ін.,

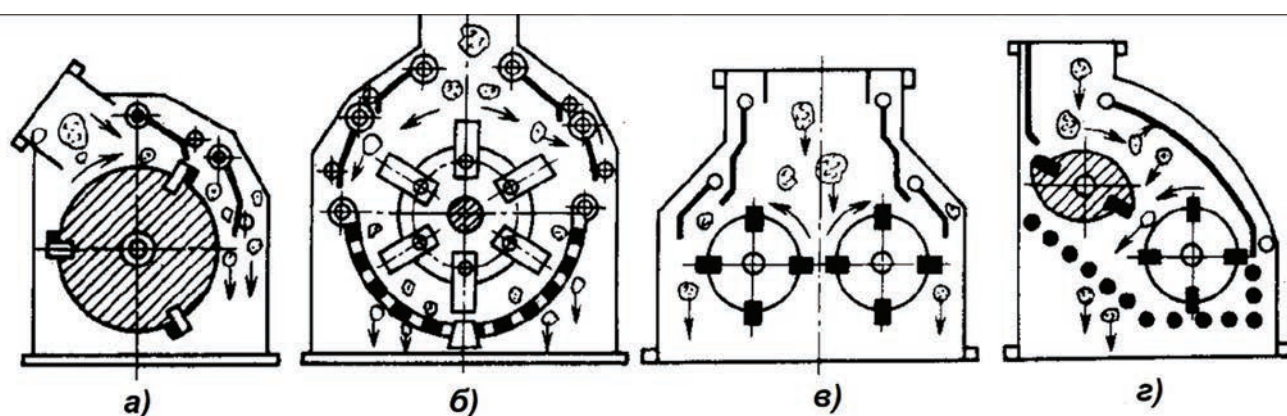


Рисунок 1 – Функціональні схеми типових дробарок ударної дії:

а, б – однороторні: з жорстко закріпленими билами (а); з шарнірно підвішеними молотками (б);
в, г – двороторні: одноступінчасті (в); двоступінчасті (г)

2011; Potarova, 2013].

Колосникові решітки займають від 80° до 180° нижньої частини кола ротора. Конструкція решіток повинна забезпечувати зміну їхнього положення відносно ротора для налаштування дробарки на задані розміри 1-5 мм подрібненої біомаси, а також для компенсації зношення молотків і реберної деки. У зв'язку з цим решітки виготовляються поворотними або підймальними, однак у деяких конструкціях дробарок вони є нерухомими, що є істотним недоліком [Ревенко та ін., 2011; Potarova, 2013].

Результати аналізу свідчать про значні переваги безрешітних дробарок ударної дії при подрібненні сировини для отримання твердого біопалива. Особливості фізико-механічних властивостей твердопаливної біомаси [Pishvae et al., 2021] та виконання технологічних процесів виробництва передбачають постановку ряду завдань, зокрема аналіз явища тонкого подрібнення і помелу сировини, обґрунтований вибір перспективного типу молоткової безрешітної дробарки, визначення основних параметрів робочих органів і розробку конструкторської документації.

Мета роботи — підвищення ефективності виробництва твердих видів біопалива шляхом застосування в технологічних ділянках подрібнення сировини перспективної молоткової безрешітної дробарки з обґрунтованими техніко-технологічними параметрами.

Методи і матеріали. Об'єктом дослі-

джень є технологічний процес і конструкція прямої молоткової безрешітної дробарки для подрібнення рослинних матеріалів до стану нормативного фракційного складу в ліній виробництва паливних гранул або брикетів.

Застосовані такі методи аналітичних досліджень:

- порівняльний аналіз процесу подрібнення рослинних матеріалів ударним способом різними типами дробарок для отримання певного за вимогами ступеня подрібнення;

- теорія удару пружно-в'язких матеріалів з метою їхнього руйнування;

- математичне моделювання процесу.

На виробництві твердих видів біопалива необхідно досягати ступеня подрібнення сировини у стані грубого помелу до розмірів частинок 1-5 мм. Як правило, найбільшу ефективність забезпечують подрібнювачі ударної дії, зокрема роторні і молоткові дробарки (рис. 1), а також штифтові подрібнювачі [Братішко, Яцко, 2013; Potarova, 2013; Поліщук, Войтюк, 2018]. Рухомі робочі органи руйнують матеріал за рахунок великих обертів понад 1500 об/хв., а також зіткнення частинок із нерухомими поверхнями робочих камер.

Такі типи дробарок застосовуються для подрібнення біомаси будь-яких властивостей за в'язкістю та твердістю. Вони забезпечують високий ступінь подрібнення: $i = 15-20$, навіть до $i = 50$, що сприяє зменшенню кількості стадій подрібнен-

ня. Дроблення матеріалу відбувається під дією механічного удару. Кінетична енергія робочих органів, що обертаються, перетворюється на деформацію руйнування [Рожківський, 2000; Potapova, 2013].

Молоткові решітні дробарки класичного виконання (рис. 2) складаються з реберних дек 1, дискових роторів 2, на яких шарнірно змонтовані молотки 3, днища у вигляді сита (решета) 4. Частинки рослинної сировини руйнуються за рахунок ударів молотків 3 і відбивання від деки 1 і решета 4. Подрібнені частинки проходять крізь перфоровану поверхню 4 у вивантажувальний пристрій. Фракційний склад продукції дроблення залежить від швидкості руху молотків 3, зазору між молотками і декою 1, розмірів отворів решета 4 [Ревенко та ін., 2011; Potapova, 2013].

Швидкість v_6 частинок рослинної сировини для ефективного подрібнення об реберну деку 1 розраховується методом теорії удару [Рожківський, 2000; 2005; Palamarchuk et al., 2015]:

$$P \tau = m v_6, \quad (1)$$

де P — руйнівне опірне зусилля вторинної частинки; τ — термін взаємодії (удару) частинки з поверхнею ($\tau \approx 10^{-5}$ с); m — маса частинки, що подрібнюється; v_6 — швидкість матеріалу в момент удару об реберну деку.

Після перетворення маємо

$$v_6 \approx v_n - v_{\text{внт}}, \quad (2)$$

де v_n — швидкість повітря в робочій зоні; $v_{\text{внт}}$ — швидкість витання частинок.

Теорія процесів подрібнення рослинних матеріалів передбачає зв'язок між затратами енергії та кінцевими розмірами частинок, фізико-механічними властивостями тощо. Згідно з гіпотезою П. Ріттингера робота A (Дж) при подрібненні рослинної біомаси пропорційна площі заново утвореної поверхні ΔF матеріалу [Devin, Tkachuk, 2015; Yeremenko, 2020]:

$$A = \Delta F \cdot k_1, \quad (3)$$

де k_1 — коефіцієнт пропорційності.

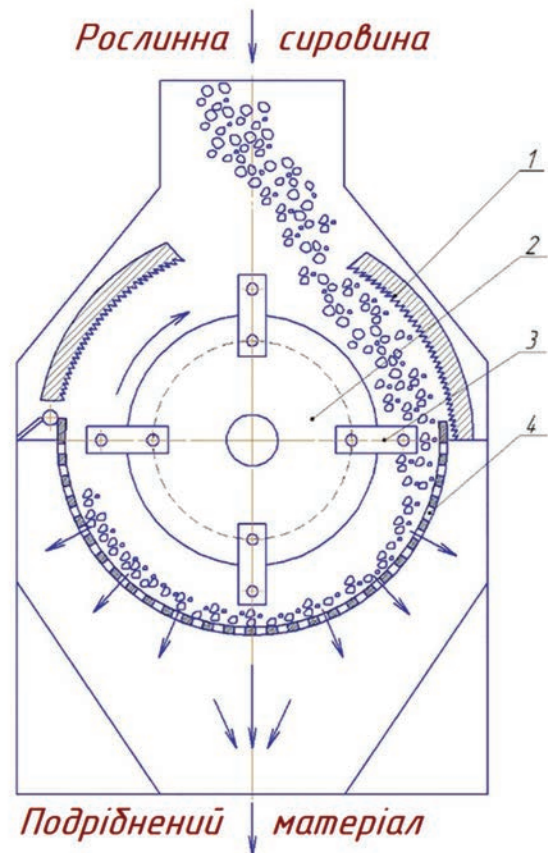


Рисунок 2 – Схема робочого процесу молоткової решітної дробарки: 1-реберна дека; 2-диск ротора; 3-молоток; 4-сито (решето)

Величину ΔF доцільно виразити через початкові d_o і кінцеві d_k розміри частинок біомаси. Якщо припустити, що частинки мають форму куба з ребрами d_o до подрібнення та $d_k = d_o / i$ після подрібнення, то поверхня матеріалу визначається за формулою:

$$\Delta F = F_k - F_o = 6 i^3 (d_o / i)^2 - 6 d_o^2 = 6 d_o^2 (i - 1), \quad (4)$$

де i — ступень подрібнення.

При подрібнюванні матеріалу об'ємом V (м³) з розмірами частинок d_o загальне число частинок дорівнює V / d_o^3 , а робота згідно з рівнянням (3) визначається так [Devin, Tkachuk, 2015; Yeremenko, 2020]:

$$A = 6 k_1 \cdot V (i - 1) / d_o. \quad (5)$$

У процесі подрібнювання рослинних матеріалів ударним способом деформу-

вання частинок та утворення нових поверхонь відбуваються одночасно. На підставі проведеного аналізу доцільно застосовувати емпіричну формулу для розрахунку споживчої потужності N (кВт) подрібнювачів [Рожківський, 2000; 2005; Ревенко та ін., 2011]:

$$N=0,13 E_i K_\phi Q_o (\sqrt{i}-1)/\sqrt{d_o}, \quad (6)$$

де E_i - енергетичний показник фізико-механічних властивостей рослинних матеріалів; K_ϕ - коефіцієнт масштабного фактору; Q_o - пропускна здатність дробарки, кг/с.

Наведені методичні положення аналізу процесу молоткових решітних дробарок зберігають теоретичну основу для розрахунків прямоточних молоткових безрешітних дробарок для ліній твердопаливних підприємств малої і середньої потужності.

Результати. Серед визначених переваг молоткових безрешітних дробарок має місце ряд типорозмірів із суттєвими недоліками: складна конструкція, невисока експлуатаційна надійність, підвищена металомісткість [Ревенко та ін., 2011]. Враховуючи ці фактори, вважаємо, що найбільш ефективним засобом для подрібнення твердопаливної сировини в лініях підприємств малої і середньої потужності буде безрешітна дробарка моделі «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» з молотковим роторним механізмом [Yeremenko, 2020].

У прийнятій дробарці (рис. 3) вторинна біомаса руйнуватиметься під дією механічних ударів молотків 22 та протидії реберної деки 3. Кінетична енергія рухомих частинок вторинної біомаси переходить в енергію їхньої деформації і руйнування. У результаті удару молотками частинки матеріалу частково руйнуються і відкидаються на реберну деку 3, що визначає зону дроблення. Ударяючись об деку 3 і 5, матеріал додатково подрібнюється і, відбиваючись, знову потрапляє під дію молоткового ротора 4. Це повторюється багато разів, поки частинки матеріалу, досягнувши заданих розмірів, не вийдуть із зони дроблення на патрубок вивантажувальний 8.

Для реалізації сили удару, необхідної для руйнування рослинного матеріалу, маса сировини має бути достатньою для створення реактивної сили інерції, що сприймає силу удару. Мінімальний критичний розмір частинок $d_{кр}$ (м) біомаси визначається за формулою:

$$d_{кр} = 230 \cdot 10^{-5} \sigma_p / (\rho v_p)^{1,5}, \quad (7)$$

де σ_p - межа міцності матеріалу при розтягуванні, Па; ρ - щільність рослинного матеріалу, кг/м³; v_p - колова швидкість молоткового ротора, м/с.

Колова швидкість v_p визначається за співвідношенням:

$$v_p = 0,0175 \sqrt[3]{[\sigma_p / (\rho D_p)]^2}. \quad (8)$$

При співударі рослинних частинок сила удару залежить від їхньої маси, відносної швидкості удару, фізико-механічних властивостей рослинних матеріалів і форм контактних поверхонь. На практиці часто має місце проміжного стану між пружним і непружним ударами.

Виходячи з балансу енергії молоткового ротора і частинок біомаси до і після удару та результатів експериментів, що враховують реальні умови процесу, застосовують формулу для розрахунку енергії дроблення $E_{дроб}$:

$$E_{дроб} = 2k_1 m_c v_p^2, \quad (9)$$

де k_1 = 0,9-0,95 - коефіцієнт, що враховує умови процесу; m_c - маса рослинної сировини, кг.

Згідно з теорією удару при співударі ротора масою m_p і частинки біомаси масою m_c , що значно менша маси ротора, швидкість частинки в напрямку удару практично дорівнює нулю. Тоді ударний імпульс S при нецентровому ударі розраховується за формулою:

$$S = m_c v_p (1 + k_b) / (1 + e^2 / r^2), \quad (10)$$

де k_b - коефіцієнт відновлення, рівний відношенню відносних швидкостей частинки до і після удару; e - ексцентриситет

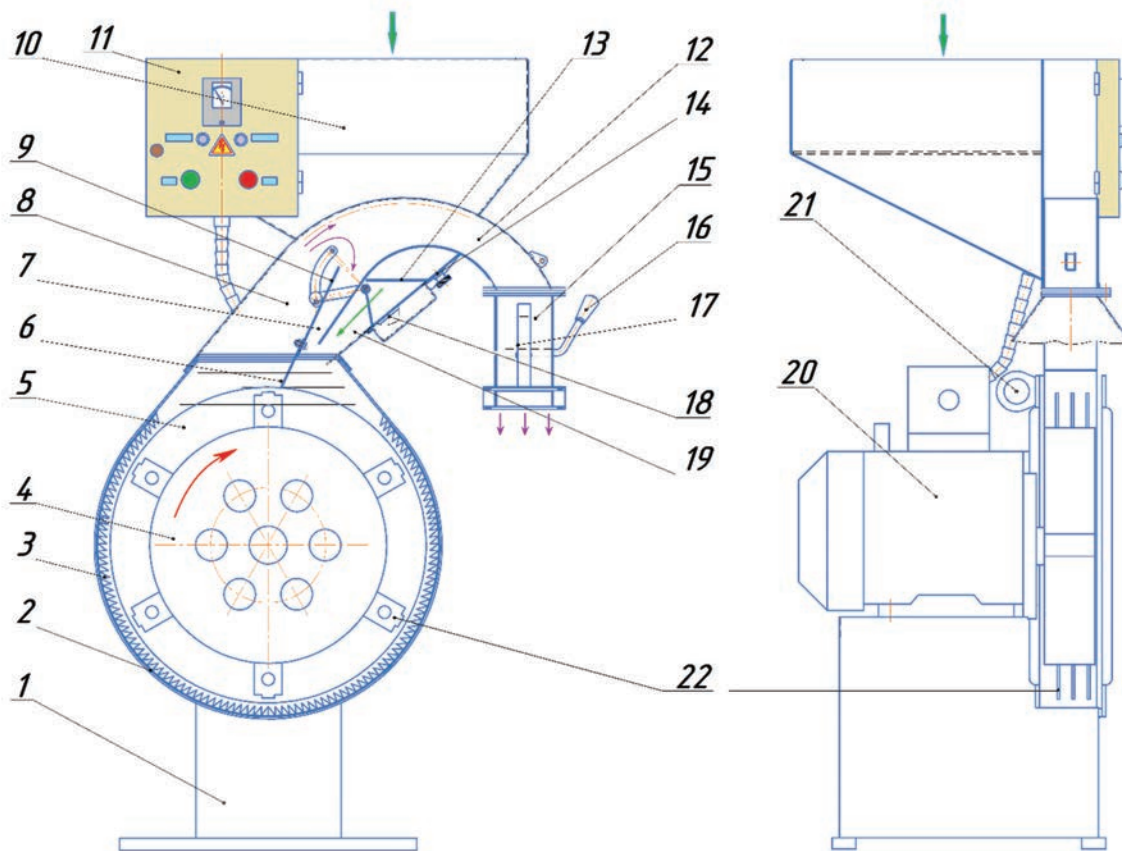


Рисунок 3 – Конструкційно-технологічна схема молоткової безрешітної дробарки «ДМБ-Ф (0,5-1,5)»: 1-рама; 2-корпус; 3-дека реберна; 4-ротор молотковий; 5-кільцеві виступи (бічні деки) дробильної камери; 6-заслінка для зміни напрямку і тиску повітряного потоку; 7-канал для замкнутого циклу повітряного потоку; 8-патрубок вивантажувальний; 9-стінка напрямна; 10-бункер; 11-пульт керування; 12-пристрій завантажувальне-вивантажувальний; 13-заслінка для зміни подачі матеріалу; 14-магнітний уловлювач; 15-розтруб вивантажувальний; 16-ручка клапана; 17-пристрій для кріплення тари; 18-патрубок завантажувальний; 19-канал для підсмоктування повітря; 20-електродвигун; 21-кронштейн для стропування; 22-молотки

ударної сили відносно центру мас частинки, м; r – радіус інерції частинки, м.

При $e = 0$, $S = m_c v_p (1 + k_b)$.

У процесі виведення формули (10) прийняте допущення, що тіла, які взаємно вдаряються, не руйнуються. У першій фазі удару кінетична енергія молотків ротора переходить у потенційну енергію пружних деформацій сировини. У цей момент частинки біомаси набувають швидкості, що дорівнює швидкості ротора.

У другій фазі енергія пружних деформацій переходить у кінетичну енергію руху частинки. При цьому частинка, відштовхуючись від молотка, отримує швидкість

$k_b v_p$. Сила удару зменшується до нуля. У реальності частинка руйнується. При цьому ударний імпульс ротора S_p (Н·с) визначається за формулою:

$$S_p = \beta m_c v_p (1 + k_b), \quad (11)$$

де $\beta = 0,4-0,5$ – коефіцієнт активності біомаси.

При коловій швидкості молоткового ротора 20-40 м/с термін удару становить 0,001-0,008 с. Проміжки між ударами, коли ротор накопичує енергію, на порядок більші – 0,012-0,024 с. Отже, на удар застосовується тільки кінетична енергія ротора.

Для здійснення дроблення молотковий ротор повинен мати динамічний момент інерції J (кг·м²):

$$J = S_p D_p / (2\omega_n \delta), \quad (12)$$

де ω_n — номінальна кутова швидкість ротора, рад/с; $\delta = (\omega_{max} - \omega_{min}) / \omega_n$ — ступінь нерівномірності обертання ротора, яка дорівнює 0,02-0,03.

Ударна сила P_y (Н) визначається за формулою:

$$P_y = \frac{2S_p}{t_y} \approx 400 S_p v_p^{0,5}, \quad (13)$$

де t_y — термін удару, с.

Ударну силу приймають як вихідне навантаження для визначення сил, діючих на вал і підшипники молоткового ротора.

Конструкційні розміри дробарок залежать від розміру максимальної частинки d_o^{max} у вихідній біомасі. Діаметр молоткового ротора для дробарок із вертикальним навантаженням $D_p = 3d_o^{max} + 550$, довжина ротора $L_p = (0,8-1,2)D_p$. Довжину молотка від осі підвіски до зовнішньої кромки доцільно приймати рівною $(0,2-0,25)D_p$. Форма і розміри молотків мають забезпечувати максимально можливе розвантаження осі їхньої підвіски при ударі.

Для забезпечення ефективності й надійності технологічного процесу прямої безрешітної дробарки встановлено, що ширина l_k потоку рослинної біомаси повинна дорівнювати довжині L_p робочої поверхні дробильної камери. Відношення кожної зазначеної довжини до свого радіуса R_k і R_p та відношення колової швидкості на кінцях молотків до середньої колової швидкості потоку матеріалу мають становити однакову і постійну величину, яка дорівнює 5 при оптимальному робочому режимі. Враховуючи технологічні і конструктивні складнощі зі створення суцільного рівномірного потоку робочою частиною кола дробильної камери, приймаємо такий параметр, що середній радіус потоку робочої маси R_k дорівнює радіусу молоткового ротора R_p .

Щоб забезпечити нормативні вимо-

ги за ступенем подрібнення для прямої безрешітної молоткової дробарки, необхідно визначити оптимальну ширину дробильної камери з урахуванням продуктивності. Встановлено, що продуктивність вказаних дробарок змінюється пропорційно ширині дробильної камери. При цьому раціональна ширина дробильної камери дорівнює 50 мм на 1 т продуктивності за годину, що визначає питому ширину дробильної камери B_k (м·с/кг) за формулою:

$$b_k = \frac{B_k}{m_t}, \quad (14)$$

де m_t — пропускна здатність дробарки, кг/с.

З рівняння (14) маємо

$$B_k = m_t b_k \quad (15)$$

$$m_t = \frac{B_k}{b_k}. \quad (16)$$

За формулою (14) питома ширина дробильної камери становить $b_k = 0,18$ м·с/кг. За формулою (15), задавши пропускну здатність дробарки, визначено ширину дробильної камери. За формулою (16), задавши ширину дробильної камери, визначено пропускну здатність (продуктивність) дробарки.

Для забезпечення необхідного ступеня подрібнення, з урахуванням максимальної твердості біомаси та фізико-механічних властивостей, мінімальна колова швидкість на кінцях молотків прямої безрешітної дробарки має бути не менше 60 м/с. Встановлено, що мінімальний радіус диску ротора повинен бути 0,2 м при частоті його обертання 2800-3000 об/хв.

Для будь-якого типорозміру прямої безрешітної дробарки при радіусі молоткового ротора в межах 0,25-0,3 м і при оптимальному робочому режимі дробарки середня колова швидкість потоку біомаси у середньому у 5 разів менша, ніж колова швидкість на кінцях молотків. Таке зменшення середньої колової швидкості потоку рослинної біомаси відбувається

за рахунок суттєвого гальмування потоку реберною декою 3 (рис. 3) дробильної камери. Це дає змогу збільшити кількість та інтенсивність ударів молотками по біомасі, що забезпечує можливість досягнення необхідного ступеня подрібнення за один прохід робочої маси через дробильну камеру.

Кількість ударів $K_{уд}$ молотками по біомасі залежить від показника її гальмування, частоти обертання ротора, кількості молотків на роторі і часу проходження молотками довжини робочої поверхні дробильної камери.

Технологічний процес дробарки «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» здійснюється так. Після виходу дробарки на холостий режим роботи відкривається регульовальна заслінка 13 (рис. 3). Рослинна сировина (твердопаливна біомаса) з вологістю 10-15 % під дією сили власного тяжіння проходить контроль магнітним уловлювачем 14 і надходить рівномірним потоком у завантажувальний патрубок 18. Разом із сипкою сировиною в дробильну камеру дробарки поступає ззовні повітря через канал для підсмоктування повітря 19. Це явище обумовлено роботою молоткового ротора 4 в режимі вентилятора. У результаті перемішування біомаси з повітрям утворюється відповідна суміш, яка сприяє рівномірності входу сировини в дробильну камеру у супутньому потоці за напрямком обертання молоткового ротора 4.

Під ударною дією молотків 22 частинки біомаси отримують кінетичну енергію, яка утворює напруження деформації в частинках. Водночас, частинки набувають колової швидкості 50 с^{-1} ротора. В наступний момент після отримання удару молотками більшість рослинних частинок ударяється об реберну деку 3, частково руйнується і втрачає швидкість, яка зменшується приблизно у п'ять разів від швидкості ротора 4. Окрім того, частинки, знаходячись у напруженому стані від удару молотків 22 і деки 3, зіштовхуються між собою і теж дробляться. Кільцеві виступи (гладенькі бокові деки) 5 дробильної камери обмежують потік сторонами і

сприяють його рівномірності.

Далі процес повторюється до виходу подрібненої біомаси з дробильної камери. У патрубку 8 (рис. 3) подрібнений матеріал продовжує рух і частково розширюється: більш важкі і менш подрібнені частинки концентруються у нижніх шарах потоку, а достатньо дроблений матеріал переміщується у верхній частині патрубку 8. Після проходження стінки напямної 9, яка регулюється, нижні шари біомаси потрапляють у канал для замкнутого циклу повітряного потоку 7 і повертаються на повторне подрібнення, а основна маса виходить у пристрій вивантажувальний 12 і далі в розтруб вивантажувальний 15 із перекидним клапаном, де розподіляється за допомогою ручки 16 в підготовлену тару або на конвеєр для технологічного переміщення.

Дроблення ударом у молоткових дробарках забезпечує більший ефект подрібнення, ніж дроблення роздавлюванням в інших типах дробарок, наприклад, щічних, валкових або конусних. Ступінь подрібнення в молоткових дробарках становить 20-30, а питомі витрати енергії на дроблення нижчі на 18-25 %. Молоткові дробарки більш економічні, їхня вартість на одиницю продуктивності у 2-5 разів нижча, ніж у валкових і щічних дробарках, а матеріалоемність молоткових подрібнювачів — у 1,4-3 разів менша.

Порівняльний аналіз молоткових решітних (ситових) і безрешітних дробарок свідчить про те, що в дробильній камері решітних дробарок значна частина біомаси прямує на повторне дроблення. У результаті, утворюється циркуляція в дробильній камері, що призводить до збільшення енергоемності, металоємності, експлуатаційних витрат. Як наслідок циркуляції біомаси в дробильній камері решітних дробарок їхня продуктивність значно (до 18 %) зменшується порівняно з безрешітними молотковими дробарками.

Техніко-технологічні переваги безрешітних молоткових дробарок порівняно з решітними (ситовими) забезпечують такі заходи:

- демонтувати з дробильної камери малоефективний і технологічно ненадійний вузол – решето (сито);

- усунути циркуляцію колом біомаси і забезпечити можливість подрібнення матеріалу в камері дробарки прямоточним циклом (без решіт);

- направляти початкову сировину на вході до дробильної камери під зустрічне зіткнення її з молотками;

- змінювати ступінь подрібнення і відбирати проби без зупинки технологічного процесу;

- зменшити колову швидкість подрібнюваної біомаси приблизно на 5 порядків від швидкості обертів ротора, що збільшує ступінь подрібнення;

- здійснити замкнутий цикл пило-повітряної суміші шляхом використання повітряного потоку, що створюється молотковим ротором.

На підставі аналізу явища подрібнення методом удару рослинних матеріалів швидкообертовими (понад 2000 об/хв) молотковими роторами визначено, що в момент удару молотки передають частинкам біомаси кінетичну енергію, яка викликає напруження і деформацію структури в частинках (І-а фаза). Потім, завдяки пружним властивостям, частинки набувають колову швидкість у попутному потоці ротора (ІІ-а фаза).

Далі процес здійснюється у двох варіантах. 1. Напруження в частинках перевищує міцність матеріалу, утворюються тріщини, частинки руйнуються. 2. Величина напруження не перевищує міцність частинок і руйнування відсутнє, однак утворюються тріщини, які при подальшій дії молотків, деки або при взаємному зіткненні частинок призводять до їхнього руйнування.

Найбільш сприятливими засобами для подрібнення біомаси для виробництва твердого палива в умовах господарства є прямоточні безрешітні дробарки «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» з молотковим ротором і реберною декою.

Дроблення біомаси в цій дробарці відбувається під дією механічного удару. При

цьому кінетична енергія робочих органів – молотків частково або повністю перетворюється на деформацію руйнування.

За результатами розрахунку молоткова безрешітна дробарка «ДМБ-Ф 0,5» при дробленні матеріалу від $d_0 = 0,02$ м, що забезпечує ступінь подрібнення $i = 30$, повинна мати технічну характеристику: продуктивність $\Pi = 0,44$ м³/с; діаметр молоткового ротора $D_p = 0,485$ м; довжина ротора $L_p = 0,1$ м, частота обертання ротора $n = 3000$ об/хв; прийнята потужність електродвигуна $N = 4$ кВт.

Обговорення. Наведені методологічні положення є підґрунтям для розрахунків параметрів і проектування прямоточної молоткової безрешітної дробарки «ДМБ-Ф (0,5-1,5)». Призначення дробарки полягає у тонкому дробленні та помелі до розмірів 0,1-5 мм усіх видів вторинної аграрної чи деревної біомаси з вологістю 8-30 % [Рожківський, 2000; Yeremenko, 2020]. Дробарка може використовуватися в лісових або фермерських господарствах у складі комплексів технологічного обладнання для виготовлення твердих видів біопалива (пелет або брикетів) із лісосічних, деревних, аграрних і переробних відходів.

Процес подрібнення – це руйнування технологічного матеріалу під дією зовнішніх рушійних сил. Залежно від крупності кінцевої продукції розрізняють такі класи подрібнення твердих органічних матеріалів: дроблення крупне (100-350 мм), середнє (40-100 мм), дрібне (5-40 мм); помел частинок (0,1-5 мм) [Ревенко та ін., 2011; Potapova, 2013]. Основною характеристикою процесу є ступінь подрібнення, яка визначається співвідношенням середньозважених розмірів частинок матеріалу до d_0 і після d_k подрібнення [Potapova, 2013; Devin, Tkachuk, 2015]. Процес подрібнення біомаси для отримання пелет або брикетів здійснюється послідовно в декілька стадій із переходом від крупного дроблення до помелу [Мельничук та ін., 2012; Clauser et al., 2021; Єременко та ін., 2021].

Енерговитрати та навантаження на ро-

бочі органи і якість здрібненої сировини залежать від міцності, крихкості, твердості, пружності, щільності рослинних матеріалів, що підтверджує складність і стохастичність процесу.

Міцність — властивість матеріалу чинити опір руйнуванню при виникненні внутрішніх напружень при навантаженні. Міцність оцінюється лімітом міцності σ_c . Деревні й рослинні матеріали поділяються на м'які ($\sigma_c < 80$ МПа), середні ($\sigma_c = 80-150$ МПа), міцні ($\sigma_c = 150-250$ МПа) [Ревенко та ін., 2011; Хайліс, Федорусь, 2004].

Крихкість є властивістю матеріалу руйнуватися без суттєвих пластичних деформацій. Вона визначається на копрі числом ударів мірного вантажу. За кількістю ударів, що витримують зразки, матеріали поділяються на дуже крихкі (до 2), крихкі (2-5) та в'язкі (5-10). Рослинний матеріал руйнується ударами молотків, що обертаються зі швидкістю 30-70 м/с, ударами об рифлену поверхню і стиранням між робочими органами [Potapova, 2013; Devin, Tkachuk, 2015; Yeremenko, 2020].

Безсумнівною перевагою біопалива з рослинних матеріалів є екологічний фактор, оскільки теплова конверсія біомаси значно знижує забруднення довкілля, порівняно з використанням мінеральних палив. Зменшуються прояви антропогенного парникового ефекту, оскільки при конверсії біопалива звільняється стільки вуглекислоти, скільки рослини сприйняли за період їхнього вирощування [Polishchuk et al., 2021]. Це явище є закритим вуглецевим обміном. При використанні твердого біопалива зменшуються викиди двоокису сірки, що не допускає утворення кислотних дощів і загибелі флори.

Базова модифікація модельної дробарки «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» складається з основних частин, позначених на рис. 3. Об'єм дробильної камери становить 67 дм³ з місткістю 45-50 кг рослинних матеріалів. Особливістю дробарки є те, що конструкція рами забезпечує можливість монтажу різних типорозмірів електродвигунів потужністю 4,0; 5,5 або 7,5 кВт відповідно до заданого модуля продуктивності: 0,8;

1,1; 1,5 т/год [Рожківський, 2005]. Молотковий ротор установлюється безпосередньо на вал електродвигуна.

Процес подрібнення вторинної біомаси в молоткових дробарках умовно поділяється на два етапи. На першому етапі матеріал руйнується ударом молотків у зоні їхнього обертання. Основне значення має швидкість молотків, структурно-механічні властивості біомаси, кут зустрічі робочої поверхні молотка з матеріалом. Колова швидкість молотків для виконання процесу змінюється в межах 40-100 м/с залежно від фізико-механічних властивостей, вологості матеріалу та стану молотків [Рожківський, 2005; Gageanu et al., 2016].

На другому етапі частинки біомаси руйнуються за рахунок повторних ударів молотків та ударів об реберну деку, а також тертя частинок робочими поверхнями. На цьому етапі головними факторами є кінетична енергія рослинних частинок від дії робочих органів, кількість молотків і схеми їхнього розміщення, зазор між молотками і реберною декою, час перебування матеріалу в зоні подрібнення [Рожківський, 2005; Piskunova et al., 2022].

При зносі молотків відстані між їхніми торцями і внутрішньою поверхнею камери дроблення збільшуються, матеріал недостатньо подрібнюється, витрати енергії на подолання тертя зростають. Окрім того, при надмірному і нерівномірному зносі молотків порушується балансування ротора, виникає вібрація, що призводить до поломок механізму. Молотки дробарок виготовляються з високоміцних легированих сталей, зокрема 30ХГС, 65Г-3, 110Г13Л тощо, з конструкційних сталей зі зміцненою поверхнею або із вуглецевих сталей з наплавленням зносостійких сплавів на робочі поверхні. Проектування і виконання реверсивного ротора молотків вдвічі підвищує ресурс дробарки [Devin, Tkachuk, 2015].

Проведені дослідження засвідчили, що молоткові решітні дробарки за технологічними і експлуатаційними показниками поступаються прямоточним молотковим

безрешітним дробаркам для умов малих і середніх за потужністю твердопаливних підприємств [Polishchuk et al., 2021].

Отже, виникає потреба в більш поглибленому аналізі та вирішенні зазначених проблем, обґрунтованому виборі для ліній твердопаливних виробництв перспективних типів дробарок, наприклад, досліджена «ДМБ-Ф (0,5-1,5)».

Висновки. Аналіз явища подрібнення біомаси підтверджує, що для успішного гранулювання або брикетування кінцевий розмір частинок сировини не повинен перевищувати 5 мм, що відповідає грубому помелу (0,1-5 мм). Це критично важливе для виробництва твердого біопалива.

Дослідження технологічних процесів і конструкцій молоткових подрібнювачів виявили значні переваги прямооточних безрешітних молоткових дробарок порівняно з традиційними решітними (ситовими) моделями. Решітні дробарки характеризуються підвищеними на 12-18% питомими енерговитратами, швидким зносом відбійних плит, забиванням отворів решіток при високій вологості сировини (понад 15%) та складністю монтажу ротора. Натомість безрешітні дробарки забезпечують рівномірне подрібнення завдяки багаторазовій ударній дії молотків.

Визначено, що найбільш ефективним рішенням для подрібнення твердопаливної сировини на малих і середніх підприємствах є безрешітна дробарка моделі «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» з молотковим роторним механізмом. Її конструкція дає змогу усунути циркуляцію біомаси в дробильній камері, що значно зменшує енерго- та металоємність, а також експлуатаційні витрати (продуктивність зростає до 18%). Ця модель забезпечує прямооточний цикл подрібнення та можливість зміни ступеня дроблення без зупинки процесу.

Запропоновані теоретичні положення, зокрема методи розрахунку енергії дроблення, ударного імпульсу та динамічного моменту інерції ротора є основою для подальшого проектування та оптимізації параметрів прямооточних безрешітних дробарок. Важливим є те, що мінімаль-

на колова швидкість на кінцях молотків має становити не менше 60 м/с, а мінімальний радіус ротора – 0,2 м при частоті обертання 2800-3000 об/хв, що дає змогу досягти необхідного ступеня подрібнення за один прохід матеріалу.

Технологічний процес подрібнення в дробарці «ДМБ-Ф (0,5-1,5)» передбачає ефективне використання кінетичної енергії молотків для руйнування біомаси, а також рециркуляцію недоподрібнених частинок через замкнутий цикл повітряного потоку, що створюється ротором. Це забезпечує високу ефективність процесу та якість кінцевого подрібненого матеріалу.

Таким чином, застосування прямооточних безрешітних молоткових дробарок, зокрема моделі «ДМБ-Ф (0,5-1,5)», дає змогу значно підвищити ефективність виробництва твердих видів біопалива завдяки оптимізації технологічних процесів, зниженню енерговитрат, підвищенню продуктивності та надійності обладнання.

Перелік літератури

Братішко, В. В., Яцко, С. А. (2013). Обґрунтування нової конструкції подрібнювача грубих кормів. Міжвідомчий наук. збірник Мех. та електр. сіль. госп-ва. Вип. 97. Т. 1. Глеваха: ННЦ ІМЕСГ. 569-575.

Дубровін, В., Єременко, О., Виговський, С., Овруцький Р. (2014). Обґрунтування раціональної конструкції дозувально-змішувального пристрою сировини біопаливних гранул. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Вип. 19 (32), кн. 2. 325-332.

Єременко, О. І., Поліщук, В. М., Шворов, С. А., Скібчик, В. І. (2021). Розрахунок обладнання для отримання біопаливних гранул і брикетів: монографія. Київ: НУБіП України. 244 с.

Железна, Т. А. (2020). Аналіз напрямків та перспектив використання агробіомаси для виробництва енергії в Україні. Техніко-технологічні аспекти розвитку

та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Вип. 27 (41). 259-267.

Мельничук, М. Д., Дубровін, В. О., Мироненко, В. Г. та ін. (2012). Альтернативна енергетика. Київ: Аграр Медіа Груп. 244 с.

Поліщук, В. М., Войтюк, В. Д. (2018). Процеси, машини та обладнання виробництва твердих і рідких біопалив: монографія. Київ: НУБіП України. 586 с.

Ревенко, І. І., Брагінець, М. В., Заболотько, О. О. та ін. (2011). Машини та обладнання для тваринництва: посібник-практикум. Київ: Кондор. 396 с.

Рожківський, М. Ф. (2000). До визначення механізму деформації і руйнування зернових матеріалів. Вісник аграрної науки. № 7. 50-53.

Рожківський, М. Ф. (2000). Теоретичні передумови до визначення механізму руйнування рослинних матеріалів у дробарках ударної дії. Техніка АПК. № 7. 4-7.

Рожківський, М. Ф. (2005). Дослідження процесу подрібнення зернових матеріалів у решітних і безрешітних молоткових дробарках. Міжвідомчий наук. збірник Мех. та електр. сіль. госп-ва. Вип. 89. Глевах: ННЦ ІМЕСГ. 288-297.

Рожківський М. Ф. (2006). Розробка наукових основ, створення і впровадження прогресивних технологій та комплексу машин нового покоління. Міжвідомчий наук. збірник Мех. та електр. сіль. госп-ва. Вип. 90. Глевах: ННЦ ІМЕСГ. 324-338.

Хайліс, Г. А., Федорусь, Ю. В. (2004). Механіка рослинних матеріалів: навчальний посібник. Луцьк: Луцький ДТУ. 301 с.

Clauser, N. M., González, G., Mendieta, C. M., Krueyanski, J., Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2021). Biomass waste as sustainable raw material for energy and fuels. Sustainability, 13(2), 794. <https://doi.org/10.3390/su13020794>

Devin, V., Tkachuk, V. (2015). Use the method finite element for design calculation of hammer crushers. MOTROL. Motorization and power industry. Vol.17. No.5. Lublin. 11-14.

Gageanu, I., Voicu, G., Bunduchi, G., Bracacescu C. (2016). Experimental research on the process of pelleting *Salix viminalis* depending on humidity and granulation. Proceedings of 15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development", May 25-27, Jelgava, Latvia, 624-628.

Palamarchuk, I., Yanovich, V., Kupchuk, I. (2015). Analysis of mathematical model of rotor vibration crusher. Motorization and power industry. Vol.17. No.4. Lublin. 139-144.

Pishvae, M.S., Mohseni, S., Bairamzadeh, S. (2021). An overview of biomass feedstocks for biofuel production. In Biomass to Biofuel Supply Chain Design and Planning under Uncertainty; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1-20.

Piskunova, L. E., Yeremenko, O. I., Zubok, T. O., Serbeniuk, H. A., Korzh, Z. V. (2022). Scientific and methodological aspects of solid biofuel production processes in compliance with labor protection and environmental safety measures. Polityka energetyczna – energy policy Journal, Volume 25. Issue 1. 143-154. DOI: 10.33223/epj/144008. URL. <https://epj.min-pan.krakow.pl/>

Polishchuk, V. M., Derevianko, D.A., Dvornyk, Ye.O. (2021). Efficiency of Production and Application of Solid Fuels in Rural Areas. Machinery and Energetics. 12 (1). 31-38. <https://doi.org/10.31548/machenergy2021.01.031>

Potapova, S. (2013). Classification and evaluation of grain mills. MOTROL. Motorization and power industry. Vol.15. No.3. Lublin. 348-355.

Yeremenko, O. I. (2020). Research of advanced crusher wood biomass for solid fuel production. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 11, No 1, 105-113. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.105-113>

References

Bratishko, V. V., Yatsko, S. A. (2013). Justification of a new design of a coarse feed grinder. Science Collection of NSC IMESG.

Issue 97, t. 1. Glevaha. 569-575.

Dubrovin, V., Yeremenko, O., Vyhovsky, S., Ovrutskyi, R. (2014). Justification of the rational design of a dosing and mixing device for biofuel pellet raw materials. Technical and technological aspects of development and testing of new machinery and technologies for agriculture in Ukraine. Vol. 19 (32), book 2. 325-332.

Yeremenko, O. I., Polishchuk, V. M., Shvorov, S. A., Skibchuk, V. I. (2021). Calculation of equipment for obtaining biofuel pellets and briquettes: monograph. Kyiv: NULE of Ukraine. 248 p.

Zheliezna, T. (2020). Analysis of areas and prospects for the use of agrobiomass for energy production in Ukraine. Technical and technological aspects of development and testing of new machinery and technologies for agriculture in Ukraine. Vol. 27 (41). 259-267.

Melnychuk M.D., Dubrovin V.A., Mironenko V.G. etc. (2012). Alternative energy. Kiev: Agrar Media Group. 244 p.

Polishchuk, V. M., Voytyuk, V. D. (2018). Processes, machines and equipment for the production of solid and liquid biofuels: monograph. Kyiv: NULE of Ukraine. 586 p.

Revenko, I. I., Braginets, M. V., Zabolotko, O. O. et al. (2011). Machinery and equipment for livestock farming: a practical manual. Kyiv: Condor. 396 p.

Rozhkivskyi, M. F. (2000). Towards the determination of the mechanism of deformation and destruction of grain materials. Bulletin of Agricultural Science. № 7. 50-53.

Rozhkivskyi, M. F. (2000). Theoretical preconditions for determination of the mechanism of destruction of plant materials in impact crusher. Machinery of agroindustrial complex. № 7. 4-7.

Rozhkivskyi, M. F. (2005). Investigation of the process of grinding of grain materials in lattice and unshielded hammer crushers. Science Collection of NSC IMESG. Issue 89. Glevaha. 288-297.

Rozhkivskyi, M. F. (2006). Development of scientific foundations, creation and implementation of progressive technologies and a

complex of new generation machines. Science Collection of NSC IMESG. Issue 90. Glevaha. 324-338.

Haylis, G. A., Fedorus, Yu. V. (2004). Mechanics of plant materials: textbook. Lutsk: Lutsk State Technical University. 301 p.

Clauser, N. M., González, G., Mendieta, C. M., Kruyeniski, J., Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2021). Biomass waste as sustainable raw material for energy and fuels. Sustainability, 13(2), 794. <https://doi.org/10.3390/su13020794>

Devin, V., Tkachuk, V. (2015). Use the method finite element for design calculation of hammer crushers. MOTROL. Motorization and power industry. Vol.17. No.5. Lublin. 11-14.

Gageanu, I., Voicu, G., Bunduchi, G., Bracacescu C. (2016). Experimental research on the process of pelleting Salix viminalis depending on humidity and granulation. Proceedings of 15th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, May 25-27, Jelgava, Latvia, 624-628.

Palamarchuk, I., Yanovich, V., Kupchuk, I. (2015). Analysis of mathematical model of rotor vibration crusher. Motorization and power industry. Vol.17. No.4. Lublin. 139-144.

Pishvae, M.S., Mohseni, S., Bairamzadeh, S. (2021). An overview of biomass feedstocks for biofuel production. In Biomass to Biofuel Supply Chain Design and Planning under Uncertainty; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1–20.

Piskunova, L. E., Yeremenko, O. I., Zubok, T. O., Serbeniuk, H. A., Korzh, Z. V. (2022). Scientific and methodological aspects of solid biofuel production processes in compliance with labor protection and environmental safety measures. Polityka energetyczna – energy policy Journal, Volume 25. Issue 1. 143-154. DOI: 10.33223/epj/144008. URL. <https://epj.min-pan.krakow.pl/>

Polishchuk, V. M., Derevianko, D.A., Dvornyk, Ye.O. (2021). Efficiency of Production and Application of Solid Fuels in Rural Areas. Machinery and Energetics. 12 (1). 31-38. <https://doi.org/10.31548/machenergy2021.01.031>

Potapova, S. (2013). Classification and

evaluation of grain mills. MOTROL. Motorization and power industry. Vol.15. No.3. Lublin. 348-355.

Yeremenko, O. I. (2020). Research of advanced crusher wood biomass for solid fuel

production. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 11, No 1, 105-113. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.105-113>.

UDC 664.734-047.37

ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF USING A SCREENLESS HAMMER CRUSHER FOR SOLID FUEL PRODUCTION LINES

Yeremenko O., Ph.D. of Technical Sc., <https://orcid.org/0000-0002-3377-0015>

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Khalin S., Ph.D. of Economic Sc., Associate Professor,

<https://orcid.org/0000-0002-7510-5056>

Haidai T., Ph.D. of Technical Sc., <https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Sarkisova M., <https://orcid.org/0000-0002-5462-6442>

Danyliuk O.,

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Summary

This article analyzes the processes of secondary biomass grinding for pellet and briquette production, substantiating the choice of grinder type and defining its parameters. The aim of this work is to increase the efficiency of solid biofuel production by using a promising hammer-mill-type screenless crusher.

Methods. *The object of research is the technological process and design of a direct-flow hammer-mill-type screenless crusher, intended for grinding plant materials to a normative fractional composition for the production of fuel pellets or briquettes. The research was based on a comparative analysis of impact grinding, impact theory, and mathematical modeling.*

Results. *For granulation or briquetting, it is necessary to grind raw materials to 0.1-5 mm. It was found that traditional screen crushers have 12-18% higher energy consumption, rapid wear, and problems with clogging openings when moisture content is high. It was determined that for grinding solid fuel raw materials at small and medium-capacity enterprises, the most effective is the screenless crusher model DMB-F (0.5-1.5) with a hammer rotor mechanism. It eliminates biomass circulation, ensuring a direct-flow grinding cycle and increasing productivity by up to 18%. The optimal tangential speed of the hammers is not less than 60 m/s, and the minimum radius of the rotor disk is 0.2 m at 2800-3000 rpm. The technological process of the DMB-F (0.5-1.5) model involves the effective use of the kinetic energy of the hammers and the recirculation of unground particles, which ensures high efficiency and quality of the final product. The use of such a crusher significantly increases the efficiency of solid biofuel production.*

Conclusions. *Research into the technological processes and designs of hammer crushers has revealed significant advantages of direct-flow hammer-mill-type screenless crushers compared to traditional screen models. The proposed theoretical provisions, in particular methods for calculating crushing energy, impact impulse, and the dynamic moment of inertia of the rotor, form the basis for further design and optimization of the parameters of direct-flow screenless crushers.*

Keywords: *secondary biomass, solid fuel production, hammer crushers, screenless crusher, process, parameters.*