

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ СТАДІЇ ПОДРІБНЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОБНИЦТВА БІОПАЛИВ

Д. М. КОРИНЧУК, кандидат технічних наук
Інститут технічної теплофізики НАН України
e-mail: Korinchuk@nas.gov.ua

Анотація. Традиційна технологія виробництва біопалив включає стадії подрібнення біомаси, сушіння та гранулювання. Стадія подрібнення є невід'ємною та важливою складовою технологічного процесу переробки біомаси на паливо. Саме вона визначає ефективність роботи обладнання наступних стадій. Збільшення частки дрібної фракції розміром 200–500 мкм в суміші дає змогу підвищити продуктивність сушильного обладнання, що пов'язано зі збільшенням поверхні випаровування частинок біомаси, та підвищити при гранулюванні кількість контактів між частками, що припадає на одиницю об'єму й забезпечити високу продуктивність гранулятора.

Для визначення енерговитрат стадії подрібнення застосовано гіпотези подрібнення. Проведено серію досліджень процесу подрібнення деревини сосни різної вологості. Отримані залежності ступеня подрібнення та енерговитрат на процес подрібнення від часу перебування сировини в дробарці. Встановлено, що гіпотеза подрібнення Бонда максимально узгоджується з дослідними залежностями витраченої енергії на подрібнення.

Проведено енергетичний аналіз стадії подрібнення із застосуванням молоткової дробарки. Показано, що енергетичні витрати на подрібнення зростають зі зростанням вологості сировини. Рекомендовано залучення в технологічний процес двостадійного подрібнення з проміжною ланкою сушіння, що дозволяє забезпечити максимальний ступінь подрібнення для ефективної роботи гранулятора, а використання на другій стадії подрібнення дробарки меншої продуктивності для подрібнення не більше, ніж 30% сировини (за масою) до розміру 200 мкм дає змогу при мінімальних енерговитратах стадії подрібнення забезпечити максимальну продуктивність технологічної лінії та високу якість кінцевого продукту.

Ключові слова: подрібнення, біомаса, деревина, енерговитрати, гіпотеза Бонда, двостадійне, енергоефективність

Актуальність. Широке застосування технологій заміщення традиційних енергоносіїв біопаливом у комунальному та промисловому секторах призвело до пошуку нових джерел біомаси, здатних задовольнити зростаючий попит. Для енергетичних цілей використовують неділову деревину, відходи, що утворюються при її обробці та переробці та

сільськогосподарські відходи. Низька ефективність енергетичного застосування непідготовлених біопалив призводить до швидкого вичерпання цього відновлюваного ресурсу. Перспективним напрямом покращення теплотехнічних властивостей біомаси є гранулювання або брикетування. Цим шляхом пішли такі країни, як Австрія, Німеччина, Франція, Італія, Канада та ін. Гранули та брикети використовують як у промислових котельнях, ТЕС, так і в побуті. На сьогодні відзначається зростання випуску обладнання для ліній виробництва твердого біопалива. Традиційно технологія включає стадії подрібнення біомаси, сушіння та гранулювання.

Як було встановлено раніше [1], у процесі гранулювання на якісні показники гранульованого палива впливають розмір часток, гранулометричний склад, вологість, вологорізниця та структурно-механічні властивості біомаси. Продуктивність гранулятора підвищується при зменшенні розміру фракції часток. Збільшення частки дрібної фракції розміром 200–500 мкм у суміші дозволяє підвищити при гранулюванні кількість контактів між частками що припадає на одиницю об'єму. Останній показник визначає міцнісні властивості гранул. Вологість біомаси впливає на в'язкопластичні властивості біомаси.

Надмірна вологість сировини може спричиняти підвищення пружних деформацій гранул, що призведе до зменшення їх міцності та руйнування. Стадія сушіння зазвичай включає барабанну сушарку з додатнім кутом нахилу. Сушарки досить добре зарекомендували себе при сушінні сировини з постійними параметрами вологості на вході. Але оскільки основний період роботи лінії виробництва біопалива припадає на осінь, зиму та весну, для сировини властиві суттєві коливання вологості, що впливає безпосередньо на продуктивність сушарки.

Так при збільшенні вологості сировини на 10% продуктивність сушарки, а відповідно, і всієї лінії, може впасти на 20%. Вплинути на продуктивність сушильного обладнання можна шляхом підвищення ступеня подрібнення сировини, тобто, зменшивши середній розмір фракції. Стадія подрібнення зазвичай включає щепоріз та молоткову дробарку, узгоджені за продуктивністю лінії. Виходячи з викладеного вище, стадія подрібнення є невід'ємною та важливою складовою технологічного процесу переробки біомаси на паливо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Молоткові дробарки досить добре зарекомендували себе в технологіях виробництва біопалив. Простота конструкцій, надійність у роботі, широкий спектр продуктивності та високий ступінь подрібнення робить їх незамінними. Однак, відзначаючи їх переваги, не можна не виділити ряд суттєвих недоліків [2], першим із яких є високі питомі витрати енергії на процес подрібнення (до 50 кВт·год/т) тоді як оптимум за співвідношенням ціна-потужність знаходиться на межі 30–50 кВт·год/т.

У літературі мало інформації присвячено обґрунтуванню роботи стадії подрібнення в технологіях виробництва біопалив. Загальні підходи до визначення енерговитрат подрібнення біомаси в цілому базуються на використанні гіпотез подрібнення [2–5]. У праці [2–4] дано енергетичну оцінку

процесів подрібнення біомаси та зроблено висновки, що максимальну ефективність процесу подрібнення матимуть пристрої, де процес буде проходити мінімальними витратами на пружну деформацію матеріалу, що подрібнюється. У праці [4] запропоновано емпіричний підхід до визначення енерговитрат стадії подрібнення, який може бути застосований для розробки інженерних методик визначення енерговитрат стадії подрібнення, але для аналізу роботи стадії подрібнення біомаси потребує проведення експериментальних досліджень роботи молоткової дробарки.

Мета дослідження – розробити енергоефективні схеми стадії подрібнення в технологіях виробництва біопалив.

Для розробки та обґрунтування енергоефективної схеми стадії подрібнення в технологіях виробництва біопалив необхідно вирішити такі задачі:

- Провести теоретичний аналіз та обґрунтувати розрахункову методику визначення енергетичних витрат на подрібнення.
- Провести енергетичний аналіз стадії подрібнення та обґрунтувати стратегію подрібнення.

Матеріали і методи дослідження. На процес подрібнення впливають дуже багато факторів, які неможливо кількісно обрахувати, тому визначення витрат енергії на подрібнення суттєво ускладнене [2, 3]. У загальному випадку концентрації дефектів у тілі виникає тріщина з розмірами, що перевищують критичний, і тіло руйнується. Робота, яка затрачається на руйнування, частково затрачається на деформацію шматків і розсіюється у вигляді теплоти, а частково – на утворення нових поверхонь. Затрати на тепло є незначними і їх в аналітичних розрахунках не враховують.

Оцінку витраченої роботи на подрібнення з достатнім наближенням можна виконати за допомогою гіпотез подрібнення. Найбільшого розповсюдження набули три гіпотези подрібнення [2, 5], а саме: гіпотеза Ріттінгера або поверхневого подрібнення, Кірпічова – Кіка або об'ємного подрібнення, та гіпотеза Бонда, що узагальнює дві попередні гіпотези. Робота за гіпотезами подрібнення визначається на подрібнення окремого шматка сировини. Якщо прийняти кількість матеріалу Q , кг для випадку подрібнення у молотковій дробарці з початковим середнім розміром шматків D_{cep} , м, при подрібненні до кінцевого розміру d_{cep} , м, то кількість

шматків n , що надходять на подрібнення, можна визначити як $n = \frac{Q}{\rho \cdot D_{cep}^3}$.

Тоді, за гіпотезою Ріттінгера, роботу, що витрачається на подрібнення, можна визначити за залежністю:

$$A = \frac{Q}{\rho \cdot D_{cep}^3} K_p \cdot D_{cep}^2 \left(\frac{D_{cep}}{d_{cep}} - 1 \right) = K_p \frac{Q}{\rho} \cdot \left(\frac{1}{d_{cep}} - \frac{1}{D_{cep}} \right); \quad (1)$$

робота для тих же умов за гіпотезою об'ємного подрібнення Кірпічова – Кіка може бути визначена за залежністю:

$$A = \frac{Q}{\rho \cdot D_{cep}^3} K_{kk} \cdot D_{cep}^3 \cdot \ln\left(\frac{D_{cep}}{d_{cep}}\right) = K_{kk} \frac{Q}{\rho} \cdot \ln\left(\frac{D_{cep}}{d_{cep}}\right); \quad (2)$$

робота за гіпотезою Бонда може бути визначена за залежністю:

$$A = \frac{Q}{\rho \cdot D_{cep}^3} K_{\sigma} \cdot D_{cep}^2 \left(\frac{D_{cep}}{d_{cep}} - 1\right) = K_{\sigma} \frac{Q}{\rho} \cdot \left(\frac{1}{d_{cep}} - \frac{1}{D_{cep}}\right); \quad (3)$$

де K_p, K_{kk}, K_{σ} – відповідні коефіцієнти пропорційності, які визначають питому роботу на подрібнення одиниці маси зразка;

ρ – густина сировини.

Для визначення коефіцієнтів пропорційності проведено серію досліджень з використанням молоткової лабораторної дробарки ММ-10м. Основні технічні характеристики наведено в табл. 1. При проведенні досліджень використовувалася деревина сосни, отримана після барабанної щепорізної машини ВК-ДН 400x1000 L-8WT «BRUKS Klöckner». Відбиралися проби масою до 4 кг. Дослідження проводилися для зразків з початковим розміром $D_{cep} = 20$ мм і вологістю 70%, 50%, 30%.

1. Технічні характеристики дробарки

| № | Параметр | Значення |
|----|---|----------|
| 1. | Продуктивність, кг / год, не менше | 400 |
| 2. | Кількість біл, шт. | 8 |
| 3. | Фракційний склад, мкм | до 100 |
| 4. | Споживана потужність, кВт, не більше | 5,5 |
| 5. | Напруга живлення від змінного струму, В | 220±22 |
| 6. | Швидкість обертання ротора, об. / хв. | 2200±100 |

Досліджувана сировина подавалася в дробарку після визначення потужності холостого ходу. Фіксувалася спожита потужність. Визначалася робота, яка витрачається при взаємодії робочого органу дробарки для подрібнення окремих шматків біомаси. Це дозволило оцінити характер впливу фізичних властивостей біомаси, таких як вологість та густина на енергоємність процесу її подрібнення. Через рівні інтервали часу роботи установки, що становили 15 або 20 с, установку вимикали, проводили ситовий аналіз та визначали середньозважену фракцію. Виходячи з того, що розмір часток є випадковою, нормально розподіленою величиною, при проведенні досліджень середньозважений розмір таких частинок визначали за формулою:

$$d_{cep}(\tau) = \sum_{i=1}^n m_i d_{icep}, \quad (4)$$

де m_i – масова частка кожної фракції подрібненого матеріалу, %;

n – кількість фракцій, %;

$d_{icep} = (d_1 + d_2) / 2$ – розмір частки деревини, що залишилися на ситі з діаметром отворів (d_2) і пройшли крізь сито з (d_1).

Вважалось, що тертя в підшипниках, тертя біл об повітря в кожному досліді постійні й враховані роботою холостого ходу за той самий час. Кількість біл не впливає на питому роботу подрібнення одиниці маси зразка, зі збільшенням кількості біл пропорційно зростатиме витрачена робота при зменшенні часу перебування часток в дробарці для досягнення однакового фракційного складу. Тоді робота витрачена на подрібнення може бути визначена за формулою:

$$A = \int_0^{\tau} (I(\tau)U(\tau) - I_{xx}U_{xx}) \cos \varphi \cdot d\tau, \quad (5)$$

де $U(\tau)$ – напруга в мережі;

$I(\tau)$ – сила струму;

U_{xx} – напруга в мережі при холостому ході;

I_{xx} – сила струму при холостому ході, $\cos \varphi = 0,90$.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 1 а, б подано залежності роботи, витраченої на подрібнення та середнього розміру фракції від часу обробки в дробарці для деревини вологістю $W = 70, 50, 30\%$.

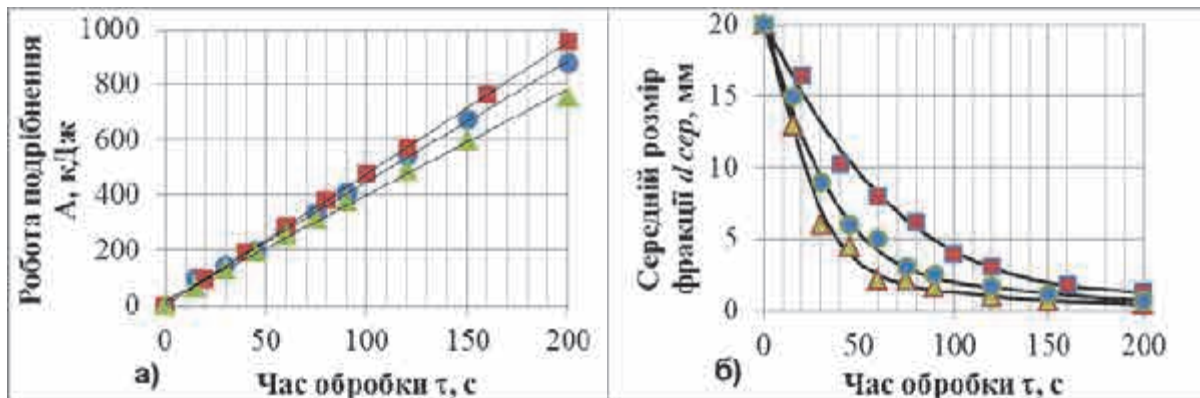


Рис. 1. Робота, витрачена на подрібнення деревини (а) та середній розмір кінцевої фракції деревини (б) залежно від часу перебування в дробарці, для вологості ■-70%, ●-50%, ▲-30%

З рис. 1 видно, що зі збільшенням вологості сировини зростає витрата енергії для отримання заданої фракції. Це пояснюється збільшенням коефіцієнта пружності вологої сировини згідно з положеннями гіпотези Кірпичова – Кіка [3]. За даними досліджень, з рівнянь (1–3) були визначені коефіцієнти пропорційності, що визначають питому роботу для інтервалу часу обробки до 200 с, що відповідають кожній з гіпотез подрібнення. Для випадку подрібнення деревини з вологістю 50% побудовані теоретичні залежності та дослідна залежність витраченої роботи за час τ (рис. 2).

Коефіцієнти кореляції між дослідними та теоретичними даними становили: за умови використання гіпотези Ріттінгера – 0,966, за умови використання гіпотези Кірпічова – Кіка – 0,97, за умови використання гіпотези Бонда – 0,997. В усьому діапазоні часу обробки найменшу похибку між результатами дослідження та розрахунковими даними мали залежності, отримані відповідно до гіпотези Бонда.

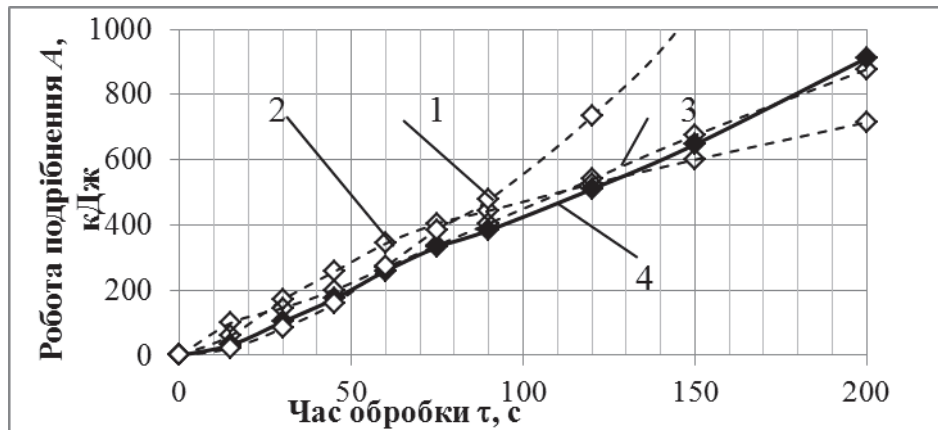


Рис. 2. Робота, витрачена на подрібнення деревини вологістю 50% залежно від часу перебування в дробарці. 1 – за гіпотезою Ріттінгера, 2 – за гіпотезою Кірпічова-Кіка, 3 – за гіпотезою Бонда, 4 – дослідні дані

У результаті математичного опрацювання результатів було одержано емпіричну залежність питомої роботи подрібнення від вологості сировини:

$$K_{\sigma}(W) = 24,7 \cdot W^{1.4}. \quad (6)$$

Залежність може бути використана в рівнянні (3), відповідно до гіпотези Бонда для аналізу процесів подрібнення (рис. 3):

$$A = K_{\sigma}(W) \cdot \frac{Q}{\rho} \left(\frac{1}{\sqrt{d_{cp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{cp}}} \right) = 24,7 \cdot W^{1.4} \cdot \frac{Q}{\rho} \left(\frac{1}{\sqrt{d_{cp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{cp}}} \right) \quad (7)$$

Теоретичний аналіз енерговитрат стадії подрібнення (рис. 3) свідчить, що при початковому розмірі щепи до 10 мм для одержання фракції розміром менше за 1 мм, з біомаси вологістю 70% необхідно витратити близько 80 кВт·год /т сировини, водночас, зменшивши вологість до 50 %, можна зменшити ці витрати до 50 кВт·год /т сировини, а для вологості менше, ніж 30% – близько 30 кВт·год /т сировини. На ринку України представлений спектр дробарок зі встановленою потужністю не більше, ніж 30 кВт при продуктивності 1 т/ год. Виходячи з даних рис. 3, граничні показники дисперсного складу біомаси вологістю 70– 50% в молоткових дробарках не будуть перевищувати 2–4 мм.

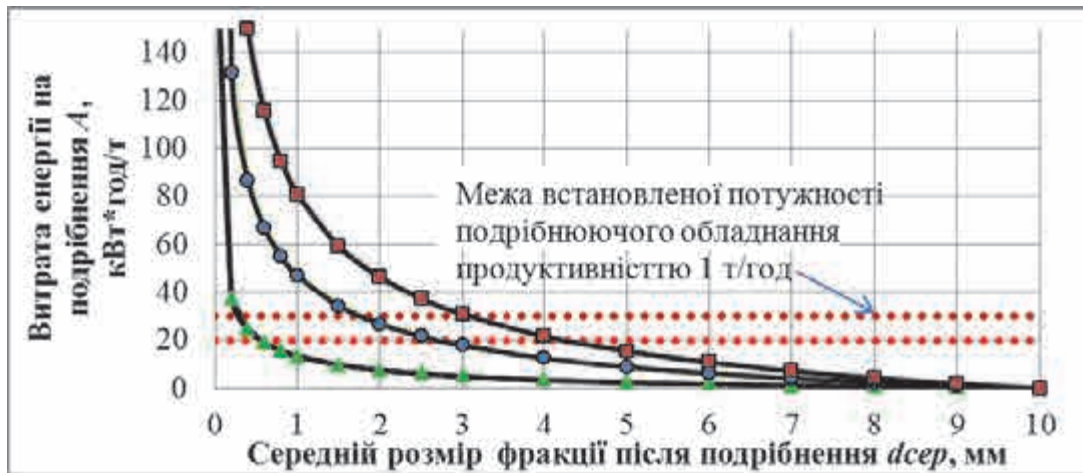


Рис. 3. Залежність енерговитрат в молотковій дробарці від ступеня подрібнення біомаси при одностадійному подрібненні в технологіях виробництва біопалива для вологості сировини ■-70%, ●-50%, ▲-30%

Для отримання фракції менше, ніж 1 мм, необхідно використовувати двостадійне подрібнення (рис. 4, схема 1). У цьому випадку, якщо дробарки стоять послідовно перед стадією сушіння, достатньо буде використовувати дві молоткові дробарки при роботі на максимальній потужності. Зменшити витрати на стадії подрібнення та одержати розмір фракції в межах 200–500 мкм можна реалізувавши наступну схему (рис. 4, схема 2): перша стадія подрібнення до середньої фракції 2 мм, стадія сушіння та друга стадія подрібнення висушеної до вологості 10–15%. Але чи потрібно подрібнювати всю біомасу до фракції 200–500 мкм? Як показали дослідження процесу гранулювання біомаси, достатнім є вміст 20–30% фракції розміром 200–500 мкм в суміші, що йде на гранулювання. Подальше збільшення вмісту дрібної фракції не веде до покращення умов пресування та властивостей гранульованого біопалива [1].

Останнє дає змогу запропонувати наступну енергоефективну технологічну схему (рис. 4, схема 3) виробництва біопалива, яка включає першу стадію подрібнення, далі йде стадія сушіння, після якої відбирається до 30% сухої біомаси вологістю не нижче, ніж 10%, та подрібнюється до розміру фракції 200 мкм. Запропонована технологічна схема 3 забезпечує стійку високопродуктивну роботу всього комплексу виробництва біопалива. Загальні витрати енергії на стадії подрібнення за останньою схемою не перевищують 25–30 кВт·год/т сировини, що вдвічі нижче, ніж електроспоживання на тонну сировини за попередніми схемами подрібнення.

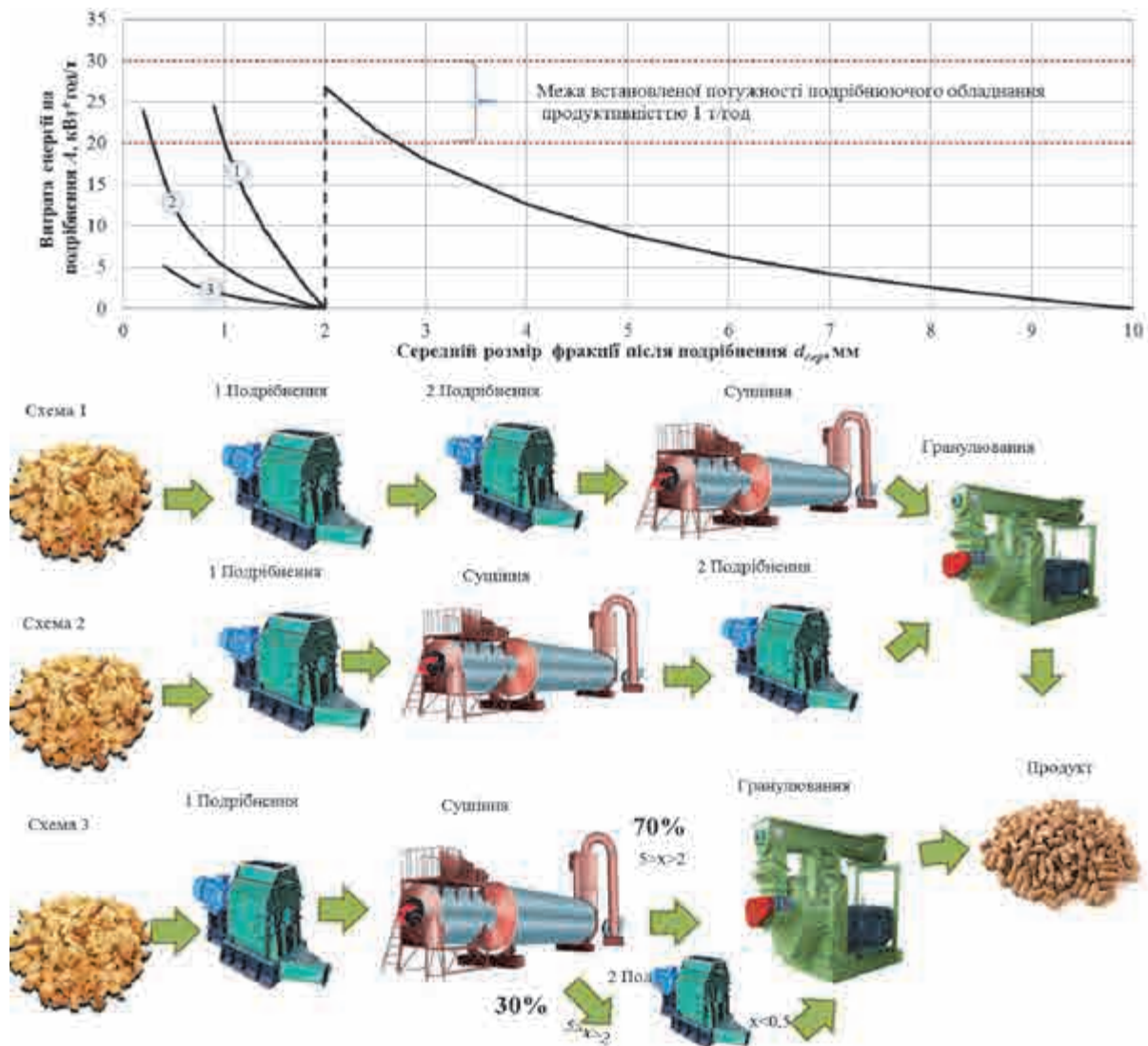


Рис. 4. Залежність енерговитрат та ступеня подрібнення від схеми подрібнення сировини в технологіях виробництва біопалив:

- 1 - при двостадійному подрібненні, 2 - при двостадійному подрібненні з проміжною стадією сушіння; 3 - при одностадійному подрібненні та доподрібненні 30% біомаси

Запропоновані розрахункові залежності та обґрунтування представлених технічних рішень проведені з використанням гіпотез подрібнення, які враховують лише базові принципи подрібнення, що є достатнім для розробки стратегічних підходів до стадії подрібнення, але не можуть бути використані для розрахунку та конструювання окремого подрібнюючого обладнання.

Висновки і перспективи. Найкраще узгодження з отриманими дослідними даними при визначенні енергоемності процесу подрібнення деревини сосни дає використання закону подрібнення Бонда (7). Визначено величину та залежність коефіцієнта пропорційності в рівнянні Бонда від вологості деревини. Встановлено, що збільшення вологості деревини призводить до зростання енерговитрат на стадії подрібнення.

Відповідно, зі збільшенням вологості сировини коефіцієнт подрібнення зменшується при однакових енерговитратах на процес.

Залучення в технологічний процес двостадійного подрібнення з проміжною ланкою сушіння дозволяє забезпечити максимальний ступінь подрібнення для ефективної роботи гранулятора, а використання на другій стадії подрібнення дробарки меншої продуктивності для подрібнення не більше, ніж 30% сировини (за масою) до розміру 200 мкм дає змогу при мінімальних енерговитратах стадії подрібнення забезпечити максимальну продуктивність технологічної лінії та високу якість кінцевого продукту. Даний підхід може бути використаний для подальших досліджень схемних рішень стадії подрібнення та вивчення енергоємності процесу дроблення в ширшому діапазоні вихідних даних (порід деревини та інших видів біомаси).

Список літератури

1. Снежкін Ю. Ф. Режими пресування та їх вплив на якісні характеристики біопалива / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Корінчук, М. М. Безгін // Тези міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». – К. : Едельвейс, 2015. – С. 358–360.
2. Нанка О. В. Молотковые дробилки – достоинства и недостатки / О. В. Нанка, И. Г. Бойко // Доклады республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса АПК». – Минск : ГИВЦ Минсельхозпрома, 2012. – С. 116–121.
3. Нанка О. В. Теорії подрібнення і їх енергетична оцінка / О. В. Нанка, І. Г. Бойко // Вісник ХНТУСГ. – 2012. – Вип. 121. – С. 211–217.
4. Ефимова Е. В. Некоторые аспекты энергоёмкости процесса переработки древесной коры / Е. В. Ефимова, А. Р. Бирман, В. В. Швецова // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – Вып. № 4 (16). – С. 156–159.
5. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – М. : Химия, 1977. – 368 с.

References

1. Sniezhkin, Yu. F., Korinchuk, D. M., Bezghin, M. M. (2015). Rezhymy presuvannya ta yikh vplyv na yakisni kharakterystyky biopalyva [Pressing modes and their influence on qualitative characteristics of biofuels]. Tezy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist u XXI stolitti. Kyiv, Edelweis, 358–360.
2. Nanka, O. V., Boyko, I. G. (2012). Molotkovyye drobilki – dostoinstva i nedostatki [Hammer Crushers – Advantages and Disadvantages]. Doklady respublikanskooy nauchno-prakticheskoy konferentsiyi «Sovremennyye problemy osvoyeniya novoy tekhniki, tekhnologiy, organizatsiyi tekhnicheskogo obsluzhivaniya APK. Minsk, GIVTS Minsel'khoproma, 116–121.
3. Nanka, O.V., Boiko, I. G. (2012)/ Teoriyi podribnennya i yikh enerhetychna otsinka [Theories of grinding and their energy assessment]. Visnyk KhNTUSH, 121, 211–217.
4. Yefimova, Ye. V., Birman, A. R., Shvetsova, V. V. (2012). Nekotoryye aspekty energoyemkosti protsessa pererabotki drevesnoy kory / Sistemy. Metody. Tekhnologii, 4(16), 156–159.
5. Sidenko, P. M. (1977). Izmel'cheniye v khimicheskoy promyshlennosti [Crushing in the chemical industry]. Moskow, Khimiya, 368.

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ СТАДИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА

Д. М. Коринчук

Аннотация. Традиционная технология производства биотоплива включает стадии измельчения биомассы, сушки и гранулирования. Стадия измельчения является неотъемлемой и важной составляющей технологического процесса переработки биомассы в топливо. Именно она определяет эффективность работы оборудования следующих стадий. Увеличение доли мелкой фракции размером 200–500 мкм в смеси позволяет повысить производительность сушильного оборудования, что связано с увеличением поверхности испарения частиц биомассы и обеспечить высокую производительность гранулятора повысив при гранулировании количество контактов между частицами биомассы.

Для определения энергозатрат стадии измельчения применены гипотезы измельчения. Проведена серия исследований процесса измельчения древесины сосны различной влажности. Получены зависимости степени измельчения и энергозатрат на процесс измельчения от времени пребывания сырья в дробилке. Установлено, что гипотеза измельчения Бонда максимально согласуется с зависимостями затраченной энергии на измельчение, полученными с помощью эксперимента.

Проведен энергетический анализ стадии измельчения с применением молотковой дробилки. Показано, что энергетические затраты на измельчение растут с ростом влажности сырья. Рекомендовано использование в технологическом процессе двухстадийного измельчения с промежуточным звеном сушки, что позволяет обеспечить максимальную степень измельчения для эффективной работы гранулятора, а использование на второй стадии измельчения дробилки меньшей производительности для измельчения не более 30% сырья (по массе) до размера 200 мкм позволяет при минимальных энергозатратах стадии измельчения обеспечить максимальную производительность технологической линии и высокое качество конечного продукта.

Ключевые слова: измельчение, биомасса, древесина, энергозатраты, гипотеза Бонда, двухстадийный, энергоэффективность

JUSTIFICATION OF ENERGY CONSUMPTION DURING THE COMMINUTION STAGE IN THE TECHNOLOGIES OF BIOFUEL PRODUCTION

D. M. Korinchuk

Abstract. The traditional technology of biofuel production includes the stages of biomass comminution, drying and granulation. The comminution stage is

an essential component of processing biomass into fuel. This stage determines the efficiency of the equipment of the following stages. Increasing the part of small fraction of 200 ... 500 μm in the mixture allows increasing the productivity of drying equipment, which is associated with increasing the evaporation surface of biomass particles, and ensuring a high productivity of the granulator, increasing the number of contacts between particles of biomass during granulation.

The hypotheses of comminution are used to determine the energy consumption of the comminution stage. A series of studies of the process of comminuting pine wood with different humidity was carried out. The dependence of the degree of comminution and energy consumption on the time of staying the raw material in the crusher is obtained. It is established that the Bond's comminution hypothesis is as much as possible consistent with the dependences of the energy consumption for comminution obtained by experiment. An energy analysis of the comminution stage with a hammer mill was carried out.

It is shown that the energy consumption for comminution increases with increasing raw material humidity. It is recommended to use in the technological process two-stage comminution with an intermediate drying stage. That allows providing the maximum comminution rate for efficient operation of the granulator. Furthermore, using of a mill with smaller capacity in the second comminution stage for comminuting up to 30% of the raw material (by weight) to a size of 200 μm allows ensuring the maximum productivity of the production line and the high quality of the final product with minimal energy consumption for comminution stage.

Keywords: comminution, biomass, wood, energy consumption, Bond's hypothesis, two-stage, energy efficiency

УДК 004.94:664.1:658.7

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИРОВИНОЮ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

С. В. МАКОВЕЦЬКА, аспірант

С. В. ГРИБКОВ, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет харчових технологій

e-mail: svetlana_un@ukr.net

Анотація. *Проведено функціональне моделювання організації та виконання оперативного управління постачання сировини на цукровий завод, що дало змогу дослідити предметну область та виявити ключову задачу управління – складання розкладу постачання сировини, розв'язок якої забезпечить покращення техніко-економічних показників виробництва цукру, за рахунок оптимізації процесів приймання,*

© С. В. Маковецька, С. В. Грибков, 2017