

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

охорони праці та біотехнічних систем у
тваринництві

(назва кафедри)

д.т.н., проф. _____ Хмельовський В.С.
(підпис) (ПІБ)

“ _____ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему **Обґрунтування режиму роботи та параметрів подрібнювача сировини для виробництва твердого біопалива з розробленням заходів безпечної праці**

Спеціальність Н7 - Агроінженерія

Гарант освітньої програми

Д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Братішко В.В.
(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

К.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Єременко О.І.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Данько М.А.
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Механіко – технологічний факультет**

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві

д.т.н., проф. _____ Хмельовський В.С.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“ _____ ” _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи магістранту**

Даньку Максиму Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

Тема магістерської роботи **Обґрунтування режиму роботи та параметрів подрібнювача сировини для виробництва твердого біопалива з розробленням заходів безпечної праці»,** затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 13 ” 11 2024 р. № 2038
Термін подання завершеної роботи на кафедру 11 листопада 2025 р.
(число, місяць, рік)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

Характеристика регіональної бази для твердого біопалива, споживчий попит на біопаливо. Аналітичні і статистичні огляди щодо розвитку твердопаливних виробництв. Технічна і технологічна документація на процеси виготовлення твердих видів палива. Науково-практичні розробки стосовно процесів подрібнення біопаливної сировини. Відомі результати наукових досліджень процесів подрібнення біомаси. Законодавча база безпечної праці на подрібнювачах рослинних матеріалів. Економічно-технологічні підгрунття визначення економічної ефективності.

Перелік питань, які потрібно розробити в розрахунково-пояснювальній записці

1. Аналіз сучасних виробничих технологій отримання твердого біопалива
2. Проектування технологічної лінії виробництва паливних виробів з біомаси
3. Аналіз процесів і конструкцій засобів для подрібнення біомаси
4. Розрахунки параметрів перспективної молоткової дробарки
5. Безпека праці та довкілля на твердопаливних виробництвах
6. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень

Перелік обов'язкових слайдів презентації

1. Схема технологічної лінії виробництва пелет в умовах господарств
2. Технологічна схема процесу подрібнення вторинної біомаси
3. Класифікація технічних засобів та робочих органів для подрібнення біомаси
4. Конструктивно-технологічна схема перспективної молоткової дробарки
5. Заходи щодо безпечної роботи на твердопаливному виробництві

Дата видачі завдання “ _20_ ” грудня 2024 р.

Керівник магістерської роботи

_____ Єременко О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

_____ Данько М.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Завдання до виконання магістерської роботи	2
Реферат	5
Вступ	6
1. МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДИХ ВИДІВ БІОПАЛИВА	7
1.1. Перспективи виробництва енергії з біомаси	7
1.2. Аналіз технологій виробництва твердих палив з біомаси	11
Висновки до розділу 1	16
2. АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ПОДРІБНЮВАЧІВ БІОМАСИ ТА ВИБІР ПЕРСПЕКТИВНОГО ТИПУ	17
2.1. Класифікація і способи подрібнення органічних матеріалів	18
2.2. Огляд подрібнювачів рослинних і деревних матеріалів	23
2.3. Аналіз дробарок ударної дії	28
2.4. Вибір перспективного типу молоткової дробарки	36
3. ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ БІОМАСИ	38
3.1. Дослідження процесу подрібнення біоматеріалів у молоткових дробарках	38
3.2. Методика технологічного розрахунку молоткової дробарки	44
3.3. Розрахунки параметрів молоткової дробарки	53
3.4. Результати розрахунку молоткової дробарки	55
3.5. Пропозиції удосконалення конструкції молоткової дробарки	61
Висновки до розділу 3	61
4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ	63
4.1. Визначення обсягу та структури витрат на виробництво продукції	63
4.2. Розрахунок капіталовкладень	63
4.3. Розрахунок експлуатаційних витрат	64
4.4. Визначення основних економічних показників	66
5. РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ БЕЗПЕЧНОЇ ПРАЦІ	68
5.1. Розрахунок вентиляції і освітлення у приміщенні	70

5.2. Заходи безпечної експлуатації твердопаливного обладнання	75
5.3. Розробка умов безпечної праці на молоткових і роторних дробарках	81
Висновки	85
Список використаних джерел	87
Додатки	93

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: **Обґрунтування режиму роботи та параметрів подрібнювача сировини для виробництва твердого біопалива з розробленням заходів безпечної праці** складається з розрахунково-пояснювальної записки загальним обсягом 94 сторінок машинописного тексту, у тому числі 81 формула, 25 рисунків, 12 таблиць, 50 літературних джерел, 3 додатки, та ілюстративного матеріалу на 12 слайдах.

Метою і завданням роботи є підвищення ефективності виробництва паливних виробів з біомаси в умовах господарств з обґрунтуванням технічних параметрів подрібнювача сировини ударної дії.

У вступі надані відомості про сучасний стан в твердопаливній галузі, обґрунтована актуальність теми роботи.

У першому розділі проведено аналіз технологій виробництва паливних виробів, прийнято схему технологічної лінії для умов господарства.

У другому розділі проаналізовано типи подрібнювачів біомаси.

У третьому розділі обґрунтовано процес і параметри подрібнювача.

У четвертому розділі визначено техніко-економічну ефективність розробки.

У п'ятому розділі розглянуті заходи безпеки твердопаливного устаткування.

У висновках наведені основні результати магістерської роботи.

ВИРОБИ, ПРОЦЕС, ПРИСТРІЙ, ПОДРІБНЮВАЧ, ДРОБАРКА, РОЗРАХУНКИ, ПАРАМЕТРИ

ВСТУП

У зв'язку з вичерпаністю надрових джерел енергії таких, як вугілля, природній газ, нафта та ін. все більшого визнання набувають альтернативні джерела енергії, в т.ч. біопалива. Рослинні рештки можна спалювати непереробленими у паливних котлах. Для підвищення ефективності транспортування, зберігання та періодичності завантаження сировини до паливного котла біомасу ущільнюють, пресують. Найбільшу щільність мають такі паливні вироби, як вироби і гранули.

Для виробництва твердого біопалива на сьогодні застосовують такі матеріали як побічну продукцію сільськогосподарських і переробних виробництв, зокрема незернову частину врожаю, рослинні рештки переробки с.-г. культур на харчові продукти; відходи лісозаготівлі та деревообробки; торф; спеціально вирощені енергетичні рослини. Проблемними питаннями більшості видів твердих біопалив, як відходів основних виробництв, є низька структурна якість та об'ємна вага, підвищена вологість та ін., що призводить до необхідності подрібнення, ущільнення, сушки для підвищення ефективності транспортування, зберігання і використання в паливних системах.

За результатами досліджень доведено [1-4], що для ефективного спалювання рослинних відходів потрібно мати паливний матеріал у вигляді частинок майже однакових за розмірами і формою. Це забезпечує необхідний контакт з киснем повітря для отримання найбільшої тепловіддачі та дає можливість механізації і автоматизації процесів в опалювальних установках. Сучасні технології, що передбачають заздалегідь подрібнених рослинних відходів, реалізують ці умови. Вони дозволяють зробити основне виробництво безвідходним, поліпшити екологічний стан та прибутки підприємства, підвищити культуру виробництва, зменшити витрати на зберігання і транспортування одержаного біопалива порівняно з необробленими відходами.

Мета магістерської роботи - підвищення ефективності виробництва паливних виробів з біомаси в умовах господарств з обґрунтуванням технічних параметрів подрібнювача ударної дії.

Розділ 1.

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДИХ ВИДІВ БІОПАЛИВА

1.1. Перспективи виробництва енергії з біомаси

Біомаса – це сумарна маса органічних речовин рослинного і тваринного походження на одиницю площі. Первинна біомаса – це рослини, тварини, мікроорганізми. Вторинна біомаса – це побічна продукція і відходи переробки первинної біомаси [1,3-5].

Щорічний приріст біомаси у світі становить близько 400 млрд. т. Енергетичний вміст приросту біомаси еквівалентний 3000 ЕДж (10^{21} Дж)/рік, що майже у 8 разів перевищує споживання усіх видів енергії. Використання енергії біомаси забезпечує на сьогодні 14 % енергоресурсів, що дорівнює 55 ЕДж/рік або 1,7 ТВт (10^{12} Вт) [11].

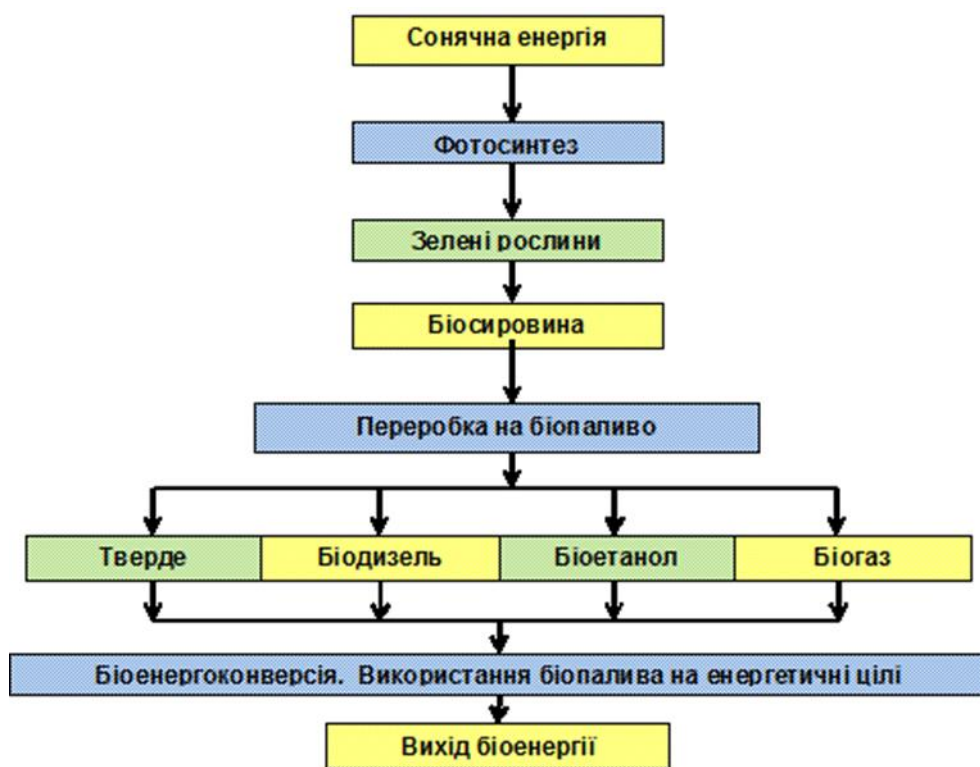
Відновлення органічної речовини в рослинах забезпечується шляхом фотосинтезу. Енергія фотонів сонячного світла перетворюється в енергію збуджених станів електронів пігменту. За рахунок електромагнітних процесів енергія акумулюється в хімічних сполуках. Наземними рослинами в процесі фотосинтезу зв'язується у вигляді цукрів близько 200 млрд. т вуглецю з атмосфери. Зв'язана хімічна енергія перетворюється в тепло при спалюванні, тобто виконується біоенергетична конверсія біомаси (рис. 1.1). Основна частина біомаси формується в лісах (приблизно 68 %) та в сільськогосподарських виробництвах (8 %) [5,11].

Враховуючи небезпеку світової енергетичної кризи, сучасну екологічну ситуацію, необхідні заходи зі збереження клімату на теперішній час інтенсивно розвиваються біопаливні виробництва з використанням побічної продукції та відходів лісових і сільських господарств для поповнення паливно-енергетичного ресурсу. Біомаса є нейтральним відносно CO_2 видом палива і викиди від її спалювання прирівнюються до нуля (рис. 1.1,б) [1-5,11,16,17].

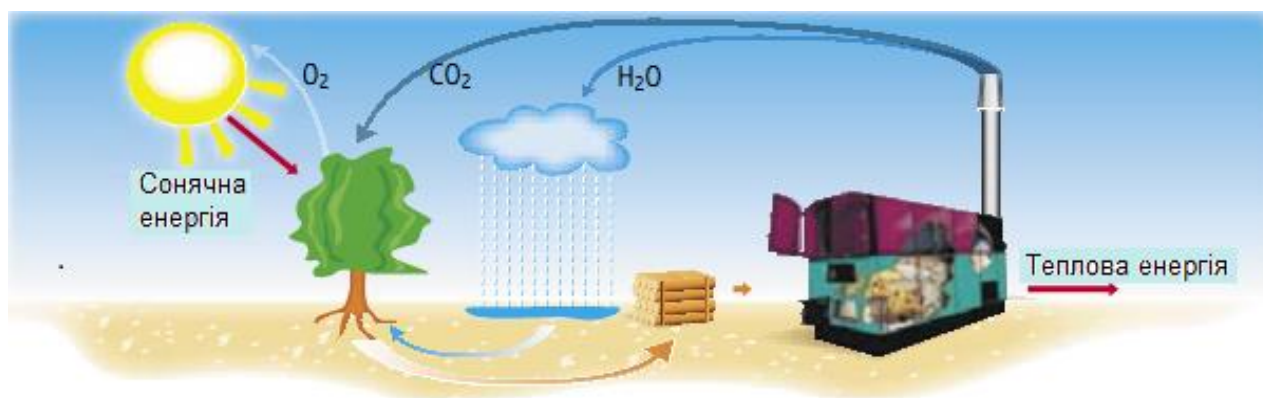
Відходи деревообробних і аграрних виробництв щодо методичних вказівок (Methods Handbook) проекту Biomass Energy Europe поділяють на дві групи [7,8]:

- первинні відходи - матеріали, що залишаються після лісозаготівлі чи збору с.-г. культур (лісосічні рештки, солома зернових, круп'яних та ін. культур;

- вторинні відходи утворюються в результаті деревообробки (тріска, стружка, тирса тощо); відходи зернопереробних, олійних та ін. виробництв.



а)



б)

Рис. 1.1. Схема перетворення сонячної енергії в паливно-енергетичні ресурси:
а – структура; б – принцип енергетичної конверсії твердого біопалива

За прогнозом Світової енергетичної ради [5,8,16] у 2020 р. щорічна частка біомаси для енергетичної конверсії становитиме 650-800 млн. т у. п., що складе 42-46 % від викопних палив. У щорічній поставці первинної енергії на сьогодні біомаса складає 10 %, що становить 1272 млн. т н. е. В країнах Африки використовують біомасу як енергоносій від 45 % до 80 %, Латинської Америки – 30-40 %. Частка

біомаси для отримання тепла в Європейському Союзі в середньому становить 15 %. Наприклад, в Латвії біомаса у внутрішньому енергоспоживанні складає 28 %, у Швеції – 22 %, Фінляндії – 21 %, Данії – 17 %, Австрії – 16 % [2,4,7,8,11,14].

Потенціали лісової біомаси для України, площа лісів яких становить 9,4 млн га або 15,7 % території України. Теоретичний і технічний потенціали лісу складають 312,24 ПДж і 89,08 ПДж відповідно. Енергетичний потенціал деревини наведено в таблиці 1.1 та представлено в ілюстративних матеріалах бакалаврської роботи [15].

Таблиця 1.1. Потенціал лісової біомаси в Україні

Тип лісової біомаси	Теоретичний потенціал		Технічний потенціал	
	ПДж *	Мт **	ПДж	Мт
Стовбурна деревина	263,7	14,7	49,9	2,8
Первинні лісові відходи	28,7	1,8	22,6	1,4
Вторинні лісові відходи	19,8	1,1	16,5	0,9
Разом	312,2	17,6	89,0	5,1

*1 ПДж = 10^{15} Дж; **Мт = 10^6 т (абсолютно сухий стан)

Аналіз показників свідчить, що статистичним методом (BEE Methods Handbook) забезпечується досить високий рівень точності, тому він може застосовуватися як для національного, так і регіонального рівнів оцінювання.

У загальному обсязі енергозабезпечення європейських країн кількість енергії, що отримується з деревини, сягає 5 %, у деяких країнах (Фінляндії, Швеції) – 16 %, у країнах СНД - біля 1 %. В Україні отримання тепла з деревини ще не набуло належного розвитку, бо навіть на багатьох деревообробних підприємствах основним джерелом тепла залишається природний газ [1,4,7,8,11,12,16]. Найбільший виробник паливних гранул в Україні – компанія “Пелет-енерго Україна” (Житомирська обл.). Компанії належить біопаливний завод потужністю 50 тис. т в рік [10,14].

Державними програмами біоенергетики більшості країн ЄС до 2020 р. передбачено доведення рівня споживання енергії з відновлюваних джерел до 20 % [7-9,14]. На теперішній час ЄС є найбільшим виробником і споживачем біопаливних

гранул у світі. Загальний щорічний обсяг виробництва пелет в країнах Європи досягає 11 млн.т. Лідерами з виробництва пелет в Європі виступають Німеччина, Швеція, Австрія, Італія, Фінляндія, Росія. Не дивлячись на те, що європейські підприємства мають суттєвий резерв збільшення обсягу виробництва, країни ЄС імпортують з-за кордону близько 4 млн. т пелет. Такі крупні споживачі як Німеччина і Австрія повністю покривають потреби місцевих ринків і експортують біопаливні гранули споживачам в інших країнах ЄС [7,8,11,14].

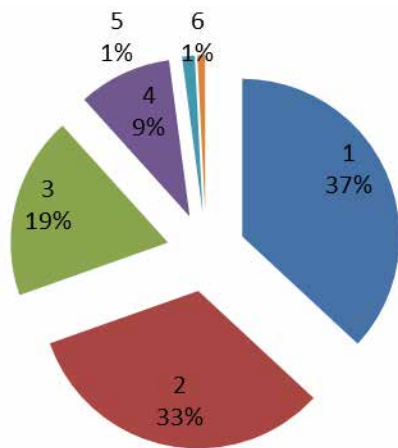


Рис. 1.2. Розподіл обсягу постачання (126 млн. т н.е.) первинної енергії в Україні:

1 – природній газ; 2 – вугілля; 3 – атомна енергетика; 4 – нафта; 5 – біомаса; 6 – гідроенергетика

В Україні твердопаливна біоенергетика з деревних та аграрних відходів розвивається досить повільно і складає 2,6 млн. т н.е. або 2 % від 126 млн. т н.е. постачання енергії. Обсяг споживання первинної теплової енергії в Україні на сьогодні становить 964 млн. ГДж (10^9 Дж), у т.ч. 67 % на побутові потреби, 20 % на промисловість, 13 % на ін. За проектом «Енергетична стратегія України до 2030 р.» попит на теплову енергію зросте до 1135 млн. ГДж [2,8,14,16].

Енергетичний потенціал деревини, доступної для виробництва енергії в Україні, оцінюється величиною близько 2 млн. т у.п./рік. Він складається в основному з відходів рубок (залишки деревини на лісосіках), деревних відходів різного походження (відходи деревообробки, меблевого виробництва та ін.) та дров для опалення. На сьогодні для виробництва енергії використовується до 1 млн. т у.п./рік деревної біомаси, у т. ч. близько 0,4 млн. т у.п./рік – дрова для населення [4,5,8,12].

Разом з цим, на будь-якому деревообробному виробництві утворюється певна кількість деревних відходів у вигляді тирси, стружки, кускових відходів. Відходи лісозаготівлі сягають декількох десятків відсотків (пеньки, сучки, хвоя). Типова лісопилка перетворює лише 60 % деревини в дошки, а 12 % виходить в тирсу, 6 % –

кінцеві обрізки, 22 % – горбиль і обрізки кромок [3,5,6,10,13,16,17]. При розпилюванні колод утворюється 35 % відходів від об'єму переробки деревини, при виробництві дверних та віконних блоків – 31 %, при виробництві паркету – 30 %, при виробництві меблів – 54 %, в ремонтних роботах на будовах і спорудах – 33 % [2,6].

Теплотворна здатність деревини (15-19 МДж/кг) рівноцінна тепловіддачі бурого вугілля. Проте, дерево з 20 %-вим вмістом вологи має теплотворність 4 кВт-год./кг, а деревина з 50 %-вим змістом вологи - 2 кВт-год./кг. Сира деревина не інтенсивно горить, сильно димить й істотно скорочує термін служби котлів, потужність яких знижується до 50 %, а витрата палива збільшуються до 2 разів [2-5,7-9,11-13,16,17].

На теперішній час в Україні експлуатуються відносно незначна кількість сучасних котлів для спалювання деревної біомаси. Основна частка опалювальної техніки на деревині сконцентрована у населення, лісгоспах і на деревообробних підприємствах. Спершу такі котли проектувались для спалювання вугілля і мазуту, а потім модернізувалися під деревину [1-4,7-9].

1.2. Аналіз технологій виробництва твердих палив з біомаси

1.2.1. Технології виробництво деревних гранул включає (рис. 1.6) попереднє подрібнення деревини, сушіння, остаточне подрібнення до стану тирси. Потім сировину пресують у деревні гранули, які охолоджують, просіюють і фасують.

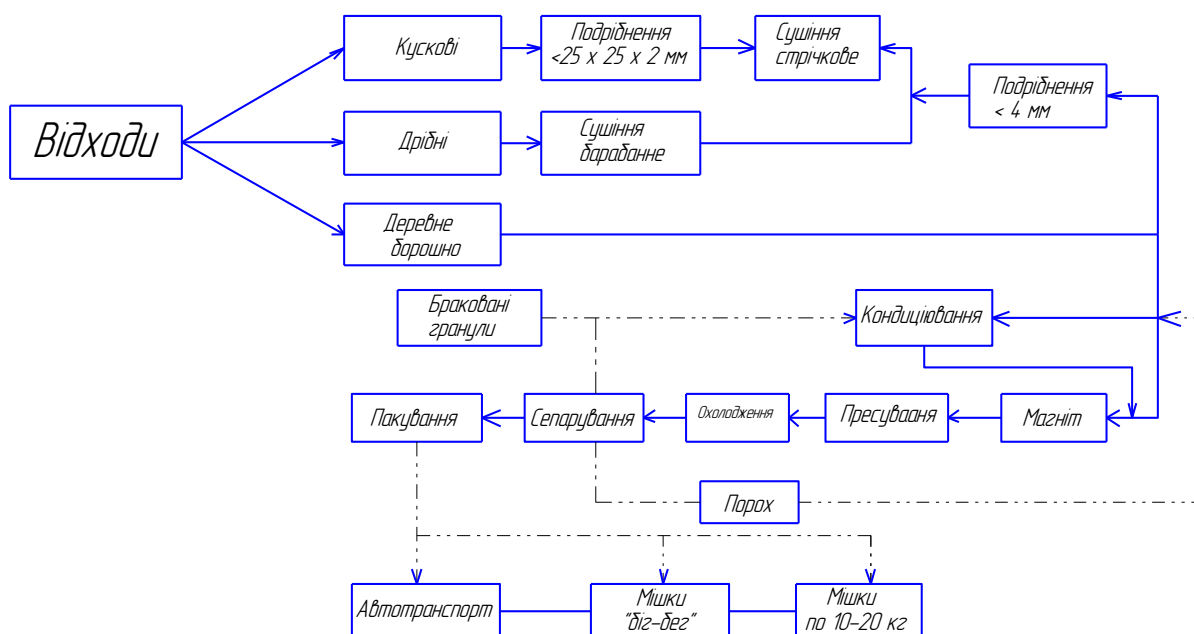


Рис. 1.3. Технологічна схема процесів виробництва деревних паливних гранул

Рекомендації фірми BUEHLER передбачають такі технологічні процеси і режими виготовлення пелет з деревних матеріалів [5,7,8,11,17,20].

Первинна обробка передбачає подрібнення та сушіння. Крупні куски деревини подрібнюють і піддають сушці до 8-14 %. Потім матеріал подрібнюють в молотковій дробарці до розмірів не більш 4 мм та отримання однорідного складу.

Кондиціонування. В деяких випадках у тирсу перед гранулюванням необхідно ввести пару чи воду для поліпшення властивостей лігніну, якщо його кількість недостатня або відбулося розкладання. Відповідно до стандарту DIN 51731 допускається додавати 2 % зернового крохмалю або борошна грубого помелу.

Гранулювання. Підготовлену сировину пресують у грануляторах з кільцевими чи плоскими матрицями шляхом продавлювання тирси роликками крізь філь'єри матриці під тиском до 20-40 МПа. Дані компанії California Pellet Mill [20] свідчать, що при діаметрі філь'єр 6-8 мм довжина каналу матриці має бути 40-45 мм.

Охолодження. Пелети виходять з гранулятора гарячими (температура складає 90-120°C). Для можливості зберігання і транспортування гранули необхідно охолодити і висушити. При цьому відбувається твердіння пелет.

Просіювання. Відокремлення дрібної фракції проводиться шляхом просіювання охолоджених гранул. Частинки, що просіялись, повертаються у гранулятор.

Технологічна лінія (рис. 1.4) [9,10,20] відображає сучасну і сприятливу для умов лісового господарства технологію виробництва деревних пелет. Сировина (тріска) поступає в **дробарку**, де подрібнюється до стану 1-5 мм. Отримана маса поступає в сушарку, з неї – у прес-гранулятор, де деревну мучку пресують у гранули. Стиснення під час пресування підвищує температуру матеріалу, лігнін, що міститься в деревині розм'якшується і склеює частки в щільні циліндри.

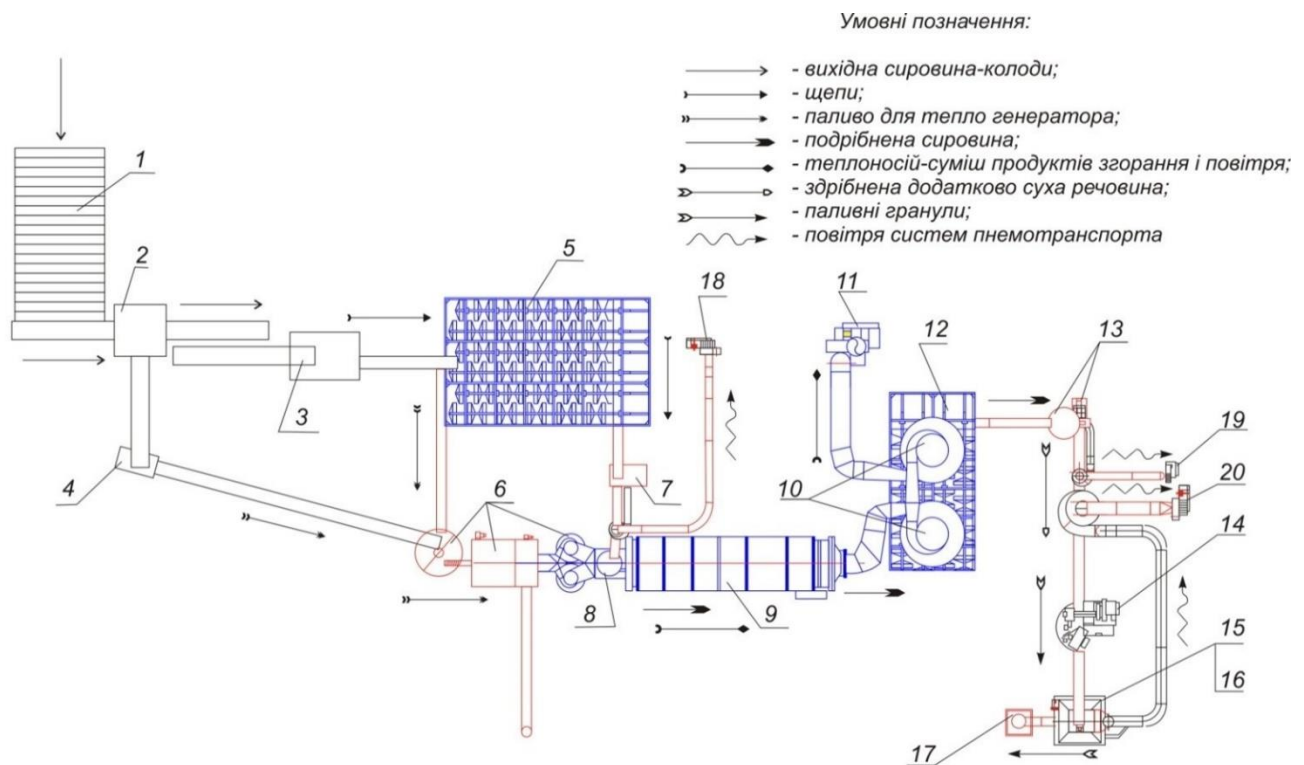


Рис. 1.4. Схема універсальної технологічної лінії виробництва пелет з деревини: 1 - розділювач колод ланцюговий; 2 - верстат для знімання кори; 3 - розрубувальна машина; 4 – корорубка; 5 - склад щепи; 6 – теплогенератор; 7 - дробарка; 8 - бункер сушарки; 9 – сушильний барабан; 10 – циклон сушильного агрегату; 11 – димосос; 12 – склад сухої сировини; 13 – дробарка з бункером-дозатором; 14 – прес-гранулятор; 15 – охолодник гранул; 16 – вібросито; 17 - пакувальник гранул; 18,19,20 - вентилятори систем пневмотранспорту

Гранули охолоджують, пакують у «біг-беги» або дрібну упаковку до 40 кг. Розрізняють промислові (доставляються насипом або в біг-бегах) і споживчі гранули (у дрібній розфасовці, орієнтовані на приватних і не великих споживачів).

За результатами та проведеного аналізу [5,7,8,11,17,20] технологічних ліній приймаємо для організації твердопаливного виробництва в умовах типового господарства схему лінії гранулювання деревних відходів, що на рис. 1.5. Технологія отримання пелет на запропонованому комплексі включає наступні стадії, невід’ємні на твердопаливних виробництвах:

- подрібнення відходів деревини до стану тирси (1-5 мм);
- сушіння сировини до 10 %;
- гранулювання підготовленої тирси;
- охолодження з 100°C до 40°C;

- просіювання та упакування гранул.

Лінії на грануляторах з плоскою матрицею (рис. 1.8) з успіхом використовують для пресування деревних матеріалів з різним розміром частинок, різною вологістю і насипною масою. Можливості застосування засобів для гранулювання деревних відходів у пелети: •стружка; •тріска; •тирса; •шліфувальний пил.

Комплекс включає всі основні машини лінії: молоткові дробарки, стрічкові сушарки, преси-гранулятори, охолоджувачі, просіювачі, що виготовляються відомими фірмами та вітчизняними виробниками.

Із-за різноманітності можливостей (різні початкові матеріали і розміри установок) лінії проектуються індивідуально за бажанням Замовника, виходячи з продуктивності і місцевих умов. Діапазон продуктивності ліній гранулювання - 0,5-8 т/год. Рентабельні навіть невеликі лінії-установки з продуктивністю тільки 200 кг/год. для столярних майстерень, яка гранулюють власні деревні відходи. Подібна установка може працювати тільки 4 години в день і бути рентабельною. Лінії понад 2 т/год. передбачені для промислового виготовлення пелет.

Залежно від початкового матеріалу лінія гранулювання деревних відходів може складатися зі всіх або декілька з приведених нижче ділянок (рис. 1.5):

- ділянка попереднього подрібнення;
- ділянка сушки;
- ділянка подрібнення;
- ділянка гранулювання і охолодження;
- ділянка готової продукції.

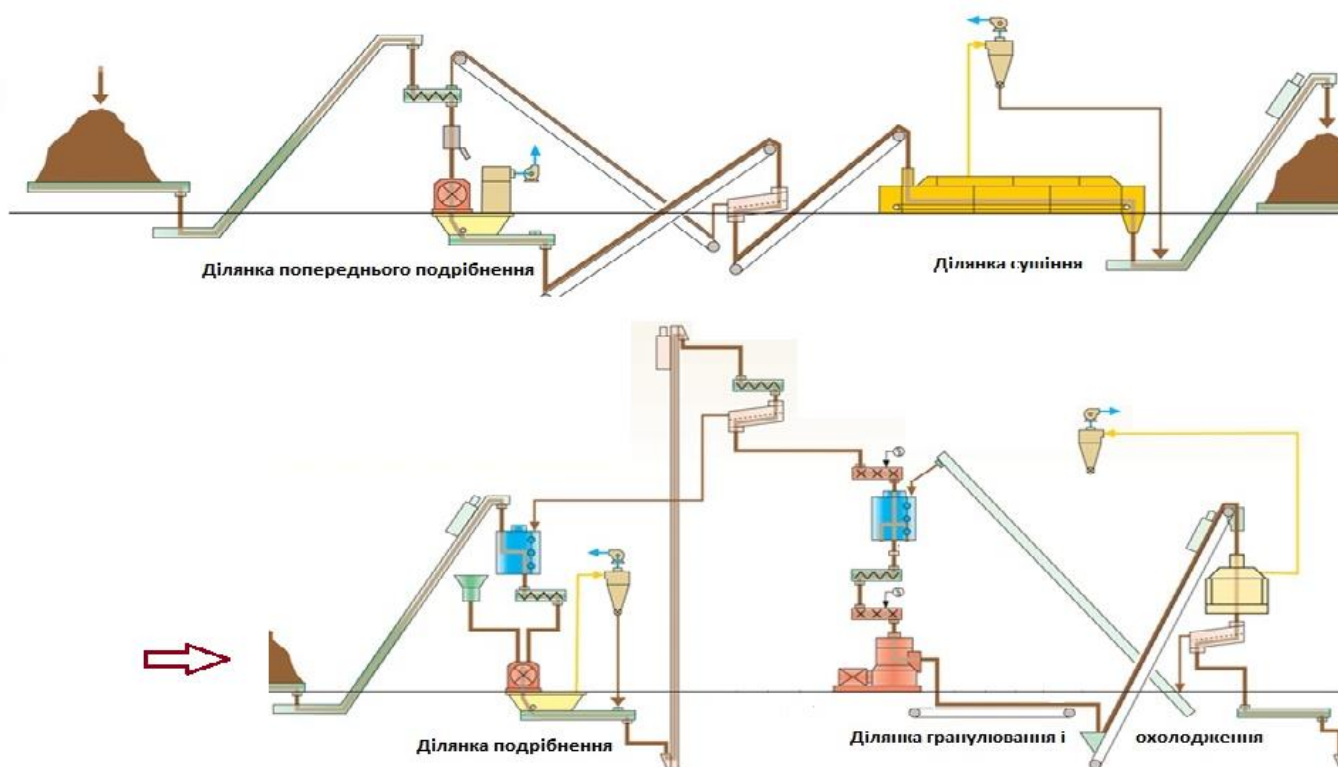


Рис. 1.5. Схема лінії гранулювання деревних відходів

Подрібнення залишків неліквідної деревини здійснюється у молотковій дробарці до розміру частинок тирси 1-5 мм. Цей процес є важливим, оскільки від розміру подрібненої деревної біомаси залежить ефективність процесу сушіння і гранулювання, який відбувається при високому тиску 40-90 МПа та температурі близько 100°C, що забезпечує виділення лігніну, як з'єднувального агенту. При охолодженні лігнін твердіє на поверхні гранул, тому їх форма залишається без змін [7,17,20].

Висновки до розділу 1

1. Сумарні потенційні ресурси відходів деревини у ЛПК та деревообробних виробництвах становлять 3743 тис. м³, що еквівалентно 984 тис. т у.п. на рік. За статистичними даними річне споживання котельник палив у лісозаготівельних галузях становить 121 тис. т у.п. та 425 тис. т у.п. в деревообробній і ЦПП. З цих даних випливає, що переважно не споживаються відходи деревини. Економічний потенціал біомаси для виробництва біопалив в Україні становить 30 млн. т у.п./рік.

2. Для ефективного спалювання деревних відходів потрібно мати паливні вироби (пелети і брикети) майже однакових за розмірами та формою. Це забезпечує необхідний контакт палива з киснем повітря для отримання найбільшої тепловіддачі та дає можливість автоматизувати процеси в опалювальних установках. Сучасні технології пресування заздалегідь подрібненої деревини реалізують ці умови.

3. Для регулювання ринку ТБП у ЄС впроваджена система стандартів, в основу якої покладена класифікація біопалив відповідно до EN 14961-1 за походженням і джерелом отримання та основними торговими формами і властивостями

4. Залежно від стану початкової деревної сировини застосовують різні технології. Перед пресуванням у пелети чи брикети потрібна тирсо подібна маса з розміром частинок близько 4 мм і вологістю 10 %.

Отже, процес подрібнення є атрибутом твердопаливного виробництва, тому обґрунтування конструкції ефективної дробарки доводить актуальність магістерської роботи, а очікуванні результати інженерної розробки підвищуватиме ефективність твердопаливних виробництв.

Розділ 2.

АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ПОДРІБНЮВАЧІВ БІОМАСИ ТА ВИБІР ПЕРСПЕКТИВНОГО ТИПУ

За результатами аналізу (див. розд. 1) фізичних властивостей та технологічних процесів виготовлення твердопаливних виробів з деревної біомаси ставиться завдання щодо обґрунтованого підбору ефективних подрібнювачів деревини для виробничих ліній типових господарств. Відомі два основних етапи технологій виробництва ТБП стосовно підготовки деревної біомаси до пристрійування (рис. 2.1).

1. Для попереднього подрібнення кускових деревних відходів, як правило, застосовують рубальні машини, які подрібнюють деревну сировину до фракції з розмірами не більше 25x25x2 мм (I-а стадія) для подальшої сушки. Краще всього для зниження енерговитрат на сушку подрібнювати до дрібнішої фракції.

2. Для виконання технологічного процесу пелетного чи твердопаливного устаткування вхідна деревна фракція має бути не більше 4 мм (II-а стадія). Такий ступінь подрібнення забезпечуватиме молоткова дробарка, верстат, що розпилює, або дезінтегратор.



Рис. 2.1. Схема основних етапів виробництва пелет з деревних матеріалів

2.1. Класифікація і способи подрібнення органічних матеріалів

2.1.1. Види, класи і характеристики процесу подрібнення. Процесом подрібнення є руйнування технологічного матеріалу, у т.ч. деревини, під дією зовнішніх рушійних сил. Під час подрібнення послідовно зменшуються розміри кусків деревного матеріалу від первинної крупності до потрібної фракції. Якщо прикладене навантаження нижче межі пружності матеріалу, то його деформація є пружною, тобто форма матеріалу відновляється після зняття навантаження. Якщо навантаження перевищує межу пружності, то матеріал отримує пластичну деформацію до досягнення навантаженням межі повзучості і остаточно руйнується. Величина межі міцності на розрив залежить від наявності в деревині тріщин, часткового руйнування або інших дефектів в його структурі [15,20,21].

Твердість є властивістю матеріалу, яку потрібно враховувати при розрахунках процесів подрібнення. Для визначення твердості часто застосовують емпіричну шкалу Мооса (Mohs). Дані про твердість різних матеріалів за цією шкалою наступні:

Тальк - 1	Кальцит - 3	Апатит - 5	Кварц - 7	Корунд - 9
Гіпс - 2	Фторошпат - 4	Польовий шпат - 6	Топаз - 8	Алмаз - 10

Твердість також вимірюють по опору матеріалу продавлюванню при локальному стисненні у тестуваннях на твердість за методами Бринеля, Роквелла і Віккерса [15].

Залежно від початкової і кінцевої крупності матеріалу розрізняють два основні види процесу подрібнення твердих матеріалів: дроблення і помел (рис. 2.2). Відповідно технічні засоби мають назву дробарки і млини. Залежно від крупності кінцевого матеріалу розрізняють такі класи подрібнення:

- **дроблення** - крупне (розмір частинок 100-350 мм),
- середнє (40-100 мм),
- дрібне (5-40 мм);
- **помел** - грубий (розмір частинок 0,1-5 мм),
- тонкий (0,05-0,1 мм),
- надтонкий (менше 0,05 мм).

Основною характеристикою процесу подрібнення є ступінь подрібнення, яка визначається співвідношенням середньозважених розмірів частинок матеріалу до і після подрібнення [15]: $i = d_o / d_k$.

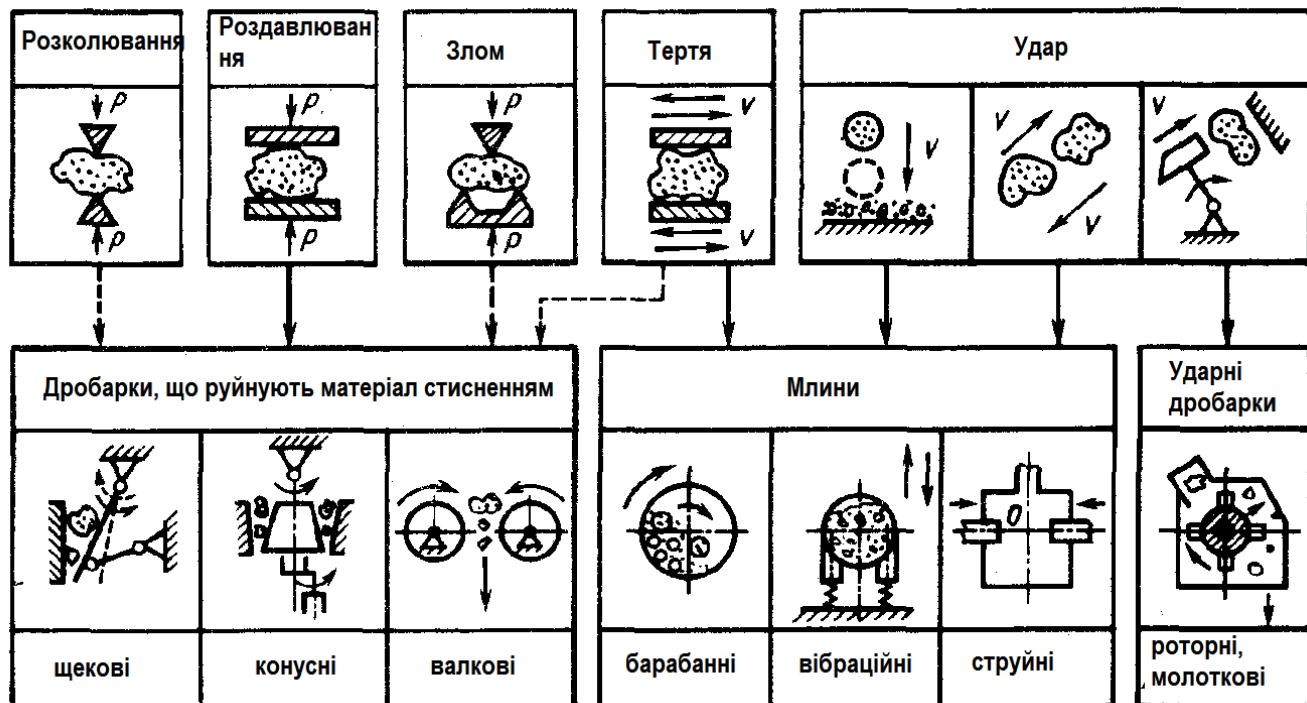


Рис. 2.2. Види руйнування твердих матеріалів в дробарках і млинах:
 ----- - переважаючі; - - - - - супутні напрямки

Ступінь подрібнення віддзеркалює технологію виробництва пелет чи виробів, визначає параметри подрібнювачів. Для забезпечення ефективності подрібнення деревного матеріалу від вихідної до кінцевої крупності здійснюється, як правило, в декілька заходів, з послідовним переходом від крупного дроблення до більш дрібного і до помелу з розділенням матеріалу по класам подрібнення. Отже, процес подрібнення деревних матеріалів для виробництва ТБП доцільно здійснювати послідовно у декілька стадій на декількох подрібнювачах [1,3,13-15,17,18].

Енерговитрати та навантаження на виконавчі подрібнювальні органи і якість здрібненої деревної біомаси залежать від міцності, хрупкості, твердості, пружності, щільності (табл. 1.3) деревних матеріалів.

Міцність - властивість деревних матеріалів чинити опір руйнуванню при виникненні внутрішніх напружень, що з'являються за результатами навантажень.

Зазвичай міцність деревних матеріалів оцінюється лімітом міцності при стисненні σ_c . Подрібнювальні деревні матеріали поділяють на м'які ($\sigma_c < 80$ МПа), середньої міцності ($\sigma_c = 80-150$ МПа), міцні ($\sigma_c = 150-250$ МПа) [5,13,15].

Крихкість - властивість деревних матеріалів руйнуватись без помітних пластичних деформацій. Вона визначається на спеціальному копрі числом ударів мірного вантажу. За числом ударів, що витримують зразки, деревні матеріали поділяють на дуже крихкі (до 2), крихкі (2-5), в'язкі (5-10) [5,13,15].

Вибір способу подрібнення деревини залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, що подрібнюється. Тверді деревні породи, наприклад, дуб, бук доцільно подрібнювати ударом або тертям. М'які (більш пластичні) породи дерев, наприклад, тополя, верба більш ефективно подрібнювати способом різання.

В залежності від призначення і принципу дії в машинах для подрібнення деревини застосовуються різні фізико-механічні дії (навантаження), зокрема різання, роздавлювання, розколювання (еквівалентно розтягненню), злом, стирання, удар [18]. Перелічені силові навантаження у процесі подрібнення діють одночасно по декількох видів. Наприклад, удар і стирання, розколювання і тертя тощо. Необхідність застосування разом різних дій за принципом впливу на деревину та конструкціями машин обумовлена чисельністю властивостей деревини, що подрібнюється, та вимогами до крупності вихідних та оброблених матеріалів. Основу конструктивно-технологічних схем засобів становлять головні способи (види) подрібнення, які також визначають назву подрібнювальної машини.

Практичні рекомендації щодо застосування відповідних способів подрібнення передбачають визначальними характеристики матеріалу, що подрібнюється. Так, дроблення міцних і крихких деревних матеріалів доцільно здійснювати роздавлюванням та зломом, а міцних і в'язких - роздавлюванням та стиранням. Крупне дроблення м'яких та крихких деревних матеріалів бажано виконувати розколюванням, середнє і дрібне - ударом. Помел твердих деревних порід частіше виконують ударом та стиранням [18].

За способом дії на подрібнювальний матеріал (рис. 2.2) поділяють дробарки, що руйнують стисненням (щоківі, конусні, валкові) і ударом (роторні, молоткові).

2.1.2. Узагальнені теоретичні основи процесів подрібнення деревних матеріалів передбачають аналітичний зв'язок між затратами енергії та початковими і кінцевими розмірами частинок, фізико-механічними властивостями деревини. В зв'язку з чисельністю впливових факторів існуючі теорії подрібнення характеризують витрати енергії в загальному вигляді, враховуючи тільки головні параметри процесу і матеріалу.

Згідно гіпотезі П. Ріттингера [18,21] робота при подрібненні матеріалу пропорційна площі заново утвореної поверхні $w \in F$:

$$A = K_1 w \in F, \quad (2.1)$$

де K_1 - коефіцієнт пропорційності.

Величину $w \in F$ можна виразити через початкові d_{p_i} і кінцеві d_{p_e} розміри деревних кусків, що подрібнюється. Якщо припустити, що куски деревини мають форму куба з розмірами ребер d_{p_i} до подрібнення та $d_{p_e} = d_{p_i}/i$ після подрібнення, то поверхня подрібненого матеріалу визначається за формулою [18]:

$$w \in F = F_{p_e} - F_{p_i} = 6i^3 \left(\frac{d_{p_i}}{i}\right)^2 - 6d_{p_i}^2 = 6d_{p_i}^2(i - 1), \quad (2.2)$$

При дробленні деревини об'ємом V (m^3) зі середніми розмірами кусків d_{p_i} загальне число подрібнюваних частинок дорівнює $V/d_{p_i}^3$, а робота дроблення у відповідності з формулою (2.1) визначається [18]:

$$A = 6K_1 V(i - 1)/d_{p_i}. \quad (2.3)$$

Робота дроблення при розрахунку через масу m_{p_j} (кг) матеріалу розраховується:

$$A = \frac{6K_1 m_{p_j}(i-1)}{\rho d_{p_i}} = \frac{K_R m_{p_j}(i-1)}{d_{p_i}}. \quad (2.4)$$

де ρ - щільність матеріалу, kg/m^3 ; K_R - коефіцієнт пропорційності між затраченою роботою і утвореною поверхню після подрібнення.

Наведена теорія не враховує змінення форми частинок в ході подрібнення, тому її застосовувати недоцільно у випадках, коли подрібнений деревний матеріал має малу питому поверхню [18,21].

За результатами інших досліджень [18,21] встановлено, що енергія для однакового змінення форми однорідних частинок пропорційна їх об'ємам, тобто

$$A = K_2 d_{p_i}^3, \quad (2.5)$$

де K_2 - коефіцієнт пропорціональності.

При подрібненні матеріалу масою m_{p_j} (кг) зі середніми розмірами кусків d_{p_i} загальна кількість подрібнювальних кусків дорівнює $\frac{m_{p_j}}{\rho_f d_{p_i}^3}$, відповідно робота подрібнення [18,21] визначається:

$$A = \frac{K_2 m_{p_j}}{\rho_f}. \quad (2.6)$$

Розглянуті фізичні явища віддзеркалюють тільки частину складних процесів подрібнення деревних матеріалів. Розрахунки на основі формули (2.6) оцінюють енергію на деформування матеріалу, але не враховує затрати на утворення нових поверхонь. Її доцільно застосовувати при крупному і середньому дробленні, коли вплив нових утворених поверхонь незначний. Теорія за формулою (2.1) не враховує затрати на пружну деформацію кусків деревини. Тому вона найбільш застосована для опису процесу дрібного дроблення та помелі деревних матеріалів.

В реальному процесі подрібнення деревини явище деформування кусків і утворення нових поверхонь відбувається одночасно [18,21,23,25,27,28]. В зв'язку з цим багато публікацій присвячено оцінюванню цього явища в комплексі. Запропоновано [18,23,25,27,28] визначати енергетичні затрати при дробленні з урахуванням роботи як деформації кусків, так і утворення нових поверхонь.

На підставі отриманих результатів пропонується емпірична формула для розрахунку споживчої потужності N (кВт) дробарок [18,21,24]:

$$N = 0,13V E_i K_{p_j} Q_{p_j} (v_{\text{€льi}} - 1) / v_{\text{€льd}_{p_i}}, \quad (2.7)$$

де E_i - енергетичний показник, що залежить від фізико-механічних властивостей подрібнювального матеріалу; K_{p_j} - коефіцієнт масштабного фактору (визначається в залежності від d_{p_i} [18,21]); d_{p_i} - середньозважений розмір кусків початкового матеріалу, м; Q_{p_j} - продуктивність (пропускна здатність) дробарки, кг/с.

На підставі проведеного аналізу явища без підпорного подрібнення кускових деревних матеріалів швидкообертливими понад 1000 об./хв. робочими органами впливає те, що під час обертання, наприклад, молоток, передає частинкам деревини кінетичну енергію, яка викликає підвищення напруження і деформацію структури у самих частинках (I-а фаза). В наступний момент завдяки пружним властивостям, тому що суха маса, частинки у попутному потоці набувають швидкість, яка перевищує лінійну швидкість робочих органів (II-а фаза). Наступний момент процесу може протікати у двох варіантах: 1. Внутрішнє напруження в частинках перевищує показники міцності матеріалу, утворюються тріщини і тіло руйнується на більш малі складові, тобто відбувається подрібнення; 2. Величина напруження не більша міцності частинок деревини і, як наслідок, повне руйнування відсутнє, а утворюються тріщини, які при наступному впливі робочого органу або при взаємному зіткненню приводять до руйнування частинок.

2.2. Огляд подрібнювачів рослинних і деревних матеріалів

Технологію з одноразовим подрібненням деревних матеріалів раціонально застосовувати на підприємствах з річним виробництвом до 3 тис. т твердопаливних виробів, де мають місце, в основному, тирса і невеликі об'єми кускових відходів, тому що відомі подрібнювачі кускових відходів в дрібну деревну масу, як правило, мають невелику продуктивність.

Приймемо за основу технологію виробництва ТБП, коли деревні кускові відходи подрібнюють на тріску (роздрібнювачку) рубильними машинами, а потім здрібнюють у тирсу дробарками.

Для подрібнення кускових деревних матеріалів на тріску застосовують рубильні машини барабанного і дискового типів [13,20]. В залежності від виду і розмірів відходів барабанні машини оснащені механізмом завантаження (подачі), а в дискових машинах передбачається похиле завантаження (рис. 2.3).

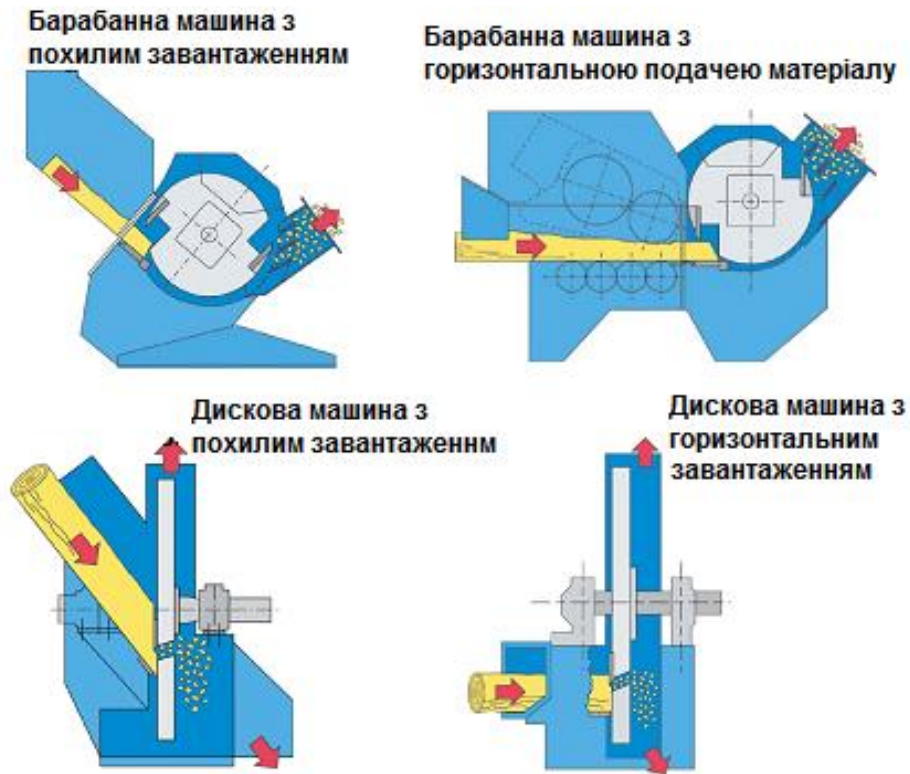
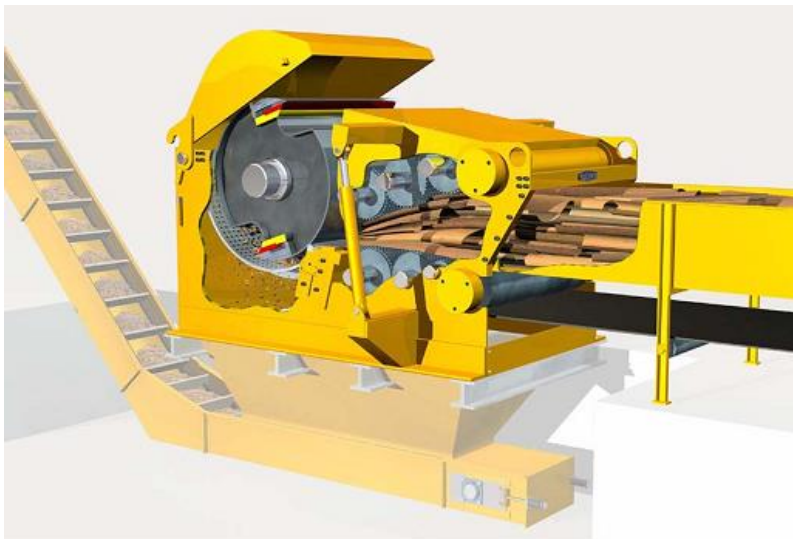


Рис. 2.3. Класифікація рубильних машин за типом механізмів подачі сировини

2.2.1. Рубильні машини барабанного і дискового типів (рис. 2.4). Використовується для подрібнення деревини різного розміру. Продуктивність від 25 до 75 м³/год. Фракція подрібненої сировини: 2 - 7 мм [13,18-20].



а)

б

Рис. 2.4. Технологічний процес машини (а) і механізм подрібнення (б)

Для подрібнення коротко мірних деревних матеріалів використовують рубильні машини з похилою подачею сировини. Довгомірні відходи подрібнюють в машинах з горизонтальним завантаженням.

Типорозмір рубильної машини визначають з урахуванням продуктивності. Основні техніко-технологічні характеристики [13,18,20,21] барабанних машин для подрібнення кускових відходів деревини, наведені у таблицях 2.1, 2.2, а характеристики дискових машин - у таблиці 2.3 та в додатку В.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики барабанних рубильних машин

Тип і марка машини	Розміри завантажувального вікна, мм	Діаметр барабана, мм	Число ножів, шт.	Потужність привода, кВт		Продуктивність, м ³ /год.	Маса, кг
				різання	подача		
Машини з горизонтальним навантаженням деревної сировини							
БРП-3402к	90x380	350	4 ¹⁾	18,5	1,5	5	1600
БРП-5422к	180x380	500	4 ¹⁾	22-30	2,2	10	1900
БРП-5423к	180x500	500	4	30	2x1,5	12	2100
Машини з похилим навантаженням деревної сировини							
БРБ-3401к	90x190	350	4	11	-	1	650
БРБ-3402к	90x380	350	4 ¹⁾	18,5	-	1,5	850

Примітка: ¹⁾ Ріжучі ножі складові, кожен виконаний з двох розмірів 200x175x15 мм. Число обертів барабана першої групи 620 хв⁻¹, другої групи - 800 хв⁻¹. Видалення тріски - униз.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики багаторізцевих барабанних машин

Показник	МРБ-2А	УРМ-5	УРМ-10	ДО-51	МРБР8-15
Продуктивність, м ³ /год.	2	5	10	10-12	15
Розміри вікна подачі, мм	230x350	200x350	300x700	300x800	750x800
Діаметр барабана, мм	450	600	800	800	950
Кількість різців, шт.	8	8	8	8	37
Число обертів барабана, хв. ⁻¹	1470	550	800	400	350
Завантаження сировини	похила	горизонтальна примусова			похила
Видалення тріски	униз, на виносний конвеєр				
Маса, кг	1100	3600	6245	5700	4900

Примітка: 1. В машині МРБР8-15ГН застосовуються різці у три леза випуклої форми. Машина призначена для подрібнення откомлівок.

2. Довжина тріски із машин знаходиться в межах 10-60 мм.

Таблиця 2.3. Технічні характеристики дискових машин

Показник	ДРН-1	ДРН-2	ДШ-3М	ДШ-4	ДШ-5
Продуктивність, м ³ /год	до 8		до 18	до 30	
Число обертів ротора, хв. ⁻¹	960	1450	720	500	555
Діаметр ротора, мм	450		1200		900
Кількість ножів, шт.	4		12	18	
Розміри вікна подачі, мм	120x390		840x200	365x1070	¹⁾ 900x210
Потужність привода, кВт	до 30		91	135	121
Маса, кг	1150	1300	6600	14900	10100
Габарити, м	2,6x0,9x1,2	2,8x1,4x1,2	4,5x2,4x2,3	4,5x3,1x1,6	3,0x2,3x1,5

Примітка: 1. В машині ДРН-2 видалення тріски є верхнє, в інших - нижнє.

2. Завантаження деревини в машинах ДРН-1 і ДРН-2 - похиле, в інших - горизонтальне примусове.

3. ¹⁾ Розміри матеріалів, що подрібнюються: ширина - до 900 мм, товщина - до 210 мм.

4. Швидкість подачі відходів у ДШ-3М - 72 м/хв., ДШ-4 - 60 м/хв.

Проведений аналітичний огляд рубильних машин свідчить про їх високу продуктивність і технологічну надійність. Проте більшість згаданих подрібнювальних машин призначені для застосування на великих спеціалізованих деревообробних підприємствах. Тому для прийнятих твердопаливних ліній господарства (див. розд. 1) розглянемо подрібнювач I-ої стадії подрібнення деревних матеріалів валково-зубчастої конструкції.

2.2.2. Валково-зубчастий подрібнювач (рис. 2.5) призначений для дроблення деревних матеріалів низької і середньої твердості, до 4 одиниць за шкалою Мооса (табл. 2.4) [15,18,20].



Рис. 2.5. Валково-зубчастий подрібнювач деревних габаритних кусків ИВЗ-2/260М

Принцип дії машини наступний: матеріал, що знаходиться в бункері, під власною вагою потрапляє на зубчаті валки, які при обертанні подрібнюють основні куски деревини. Подрібнена маса проходить в осьові і радіальні зазори між валками подрібнення. Подрібнювач може працювати під безперервним завантаженням сировинних деревних матеріалів.

Таблиця 2.4. Технічні характеристики валково-зубчастого подрібнювача ИВЗ-2/260М

Параметри	Значення
Розрахункова продуктивність, м ³ /год.	0,8-20*
Фракція, що входить, мм	100-300
Фракція, що виходить, мм	15-60
Частота обертання валків, об./хв.	412*; 360*
Діаметр валків, мм	215-245
Довжина валків, мм	450
Умовний зазор, мм	10-40
Об'єм бункера, м ³	0,18
Електродвигун: тип	4А160S6У3
потужність, кВт	11
частота обертання, об./хв.	1000
Маса, кг	650

Подрібнювачі типу ИВЗ-2/260М призначені для застосування в лініях первинної підготовки, як перший ступінь подрібнення габаритних кусків деревних відходів. Завантаження подрібнювачів можна проводити за допомогою стрічкових живильників різних модифікацій залежно від місця установки і загальної компоновки обладнання на ділянці здрибнення. Подача деревної сировини здійснюється порціями або потоковим способом. Подрібнювачі монтуються на опорних стійках,

майданчиках і фундаментах, як в приміщенні, так і на відкритому майданчику під навісом [18,20], що занадто важливо для умов господарств.

За результатами проведеного аналізу приймаємо для виконання I-ої стадії подрібнення деревних матеріалів валково-зубчасту машину ИВЗ-2/260М. Підґрунтям такого вибору є досить висока продуктивність (до 20 м³/год.), універсальність її застосування в лініях гранулювання і брикетування деревних матеріалів, невелика матеріаломісткість (маса 650 кг), простота експлуатації, що сприятливо для умов лісових господарств, висока економічна ефективність. Розроблено конструкторська документація на дану машину, креслення загального виду наведено в ілюстративних матеріалах бакалаврської роботи.

2.3. Аналіз дробарок ударної дії

У подрібнювачах ударної дії процес здійснюється під дією сил, які виникають при взаємному зіткненні частинок подрібнювального деревного матеріалу, зіткненні матеріалу з рухомими робочими органами, з нерухомими поверхнями робочих камер пристрою. До подрібнювачів ударної дії відносять роторні і молоткові дробарки, а також пальцеві подрібнювачі (рис. 2.2).

2.3.1. Особливості процесу і класифікація дробарок. В зазначених дробарках частинки деревини підлягають дії робочих органів з одного боку. При цьому сила, що виникає, врівноважується силою інерції кусків деревини, яка має бути достатньою для утворення руйнівних напружень.

Дроблення деревного матеріалу відбувається під дією механічного удару. При цьому кінетична енергія виконавчих органів, що рухаються, частково або повністю перетворюється в деформації руйнування.

Данні дробарки застосовують для подрібнення мало в'язких матеріалів середньої міцності, як тверді породи дерев, і м'яких матеріалів, як породи дерев середньої твердості, зокрема хвойні, береза, верба тощо. Вони дозволяють отримувати високий ступінь подрібнення: $i = 15-20$, в окремих випадках до $i = 50$, що сприяє зменшенню кількості стадій подрібнення. Дробарки

відрізняються простотою конструкції і експлуатації, універсальністю дроблення і відносно малою металомісткістю [18].

За конструкцією робочих органів розрізняють роторні з жорстко закріпленими билами (рис. 2.6, а,в,г), молоткові з шарнірно підвішеними молотками (рис. 2.6, б).

За числом роторів дробарки поділяють на однороторні (рис. 2.6, а) і двороторні (2.6, в,г). Останні одноступінчастого дроблення (рис. 2.6, в) мають високу продуктивність. Вихідний матеріал надходить рівномірно на обидва ротора, котрі обертаються незалежно в одному корпусі. В машинах двоступінчастого дроблення (рис. 2.6, г) деревний матеріал в зоні дії першого ротора зазнає попередньому дробленню, а потім в зоні дії другого ротора - повторному дробленню [18,21].

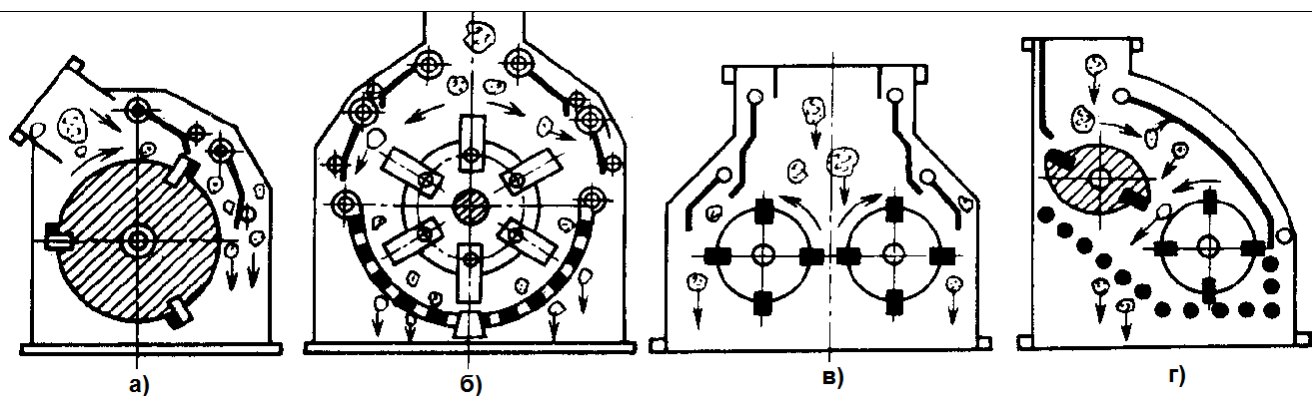


Рис. 2.6. Конструкторсько-функціональні схеми дробарок ударної дії:

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

Роторні дробарки (рис. 2.6, а,в,г) застосовуються для дроблення крупних кусків деревини, тому що подрібнювачі мають масивний ротор, функціонування якого сприяє великому запасу потенційної енергії робочих органів.

В молоткових дробарках (рис. 2.6, б) процес дроблення визначає тільки кінетична енергія самого молотка [18,21].

Типорозміри роторних і молоткових дробарок встановлюють діаметром і довжиною ротора [18,20,21].

2.3.2. Конструкційно-технологічні схеми дробарок. За технологічним призначенням роторні дробарки поділяють на машини крупного (ДРК), середнього

(ДРС) і дрібного (ДРД) дроблення. Принципово конструкційні схеми даних дробарок ідентичні і відрізняються числом відбивних плит і розмірами роторів.

Камера дроблення у дробарок ДРК утворюється ротором і двома відбивними плитами, у дробарок ДРС і ДРД - ротором і трьома плитами.

Корпус дробарки (рис. 2.7) є зварним, роз'ємним, складається із станини 1 і верхньої частини 2, яка зсередини футерована броньовими плитами 3. Вал ротора 8 встановлений на роликівих підшипниках, розташованих в корпусах станини 1. Корпус ротора - сталевий, литий, в пазах клинами закріплені біла 6 із зносостійкої сталі або відбіленого чавуна [18,21].

Простір між ротором, відбивною плитою 4 і боковими футерованими плитами утворюють камеру дроблення. Для регулювання ступені подрібнення відстань між нижніми кромками відбивних плит 4 та білами 6 змінюється за допомогою підпружинних тяг 5, які є також запобіжними механізмами від поломок.

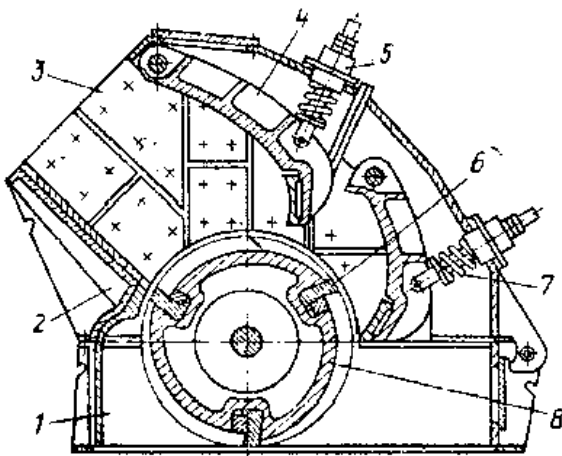


Рис. 2.7. Конструкційна схема роторної дробарки

Корпус молоткової дробарки (рис. 2.8) складається з основи 1 і кришки 10. У зварному корпусі на підшипниках 2 обертається вал ротора 3. Корпус зсередини футерований змінними броньованими плитами і відбивною плитою 9.

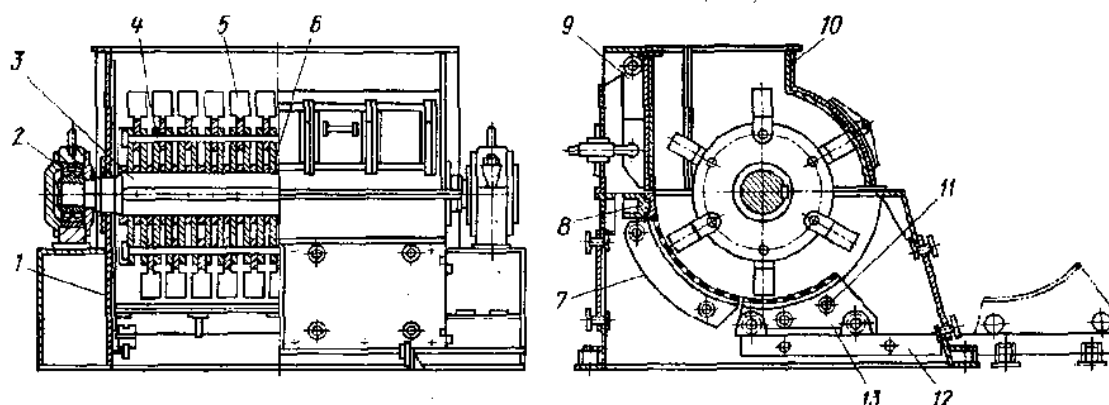


Рис. 2.8. Конструкційна схема молоткової дробарки

На валу ротора розташовані диски 6 з дистанційними кільцями між ними. Через диски проходять вісі 4 з шарнірно підвішеними молотками 5. Число рядів молотків та їх загальна кількість визначається призначенням дробарки і її розмірами. На великих дробарках встановлюють до 100 молотків масою 4-70 кг в залежності від типорозміру дробарки. Для регулювання розміру частинок матеріалу в крупних дробарках використовується відбійний брус 8, той що переміщується в напрямних і фіксується гвинтами. У нижній частині камери дроблення встановлені дві колосникові решітки, а саме: поворотна 7, шарнірно підвищена і та, що викочує. Рама 13 викатної решітки встановлена на котках, опорами для яких є рійки 12. Зазор між викатною решіткою регулюють обертанням ексцентриків 11.

Була і молотки, що працюють у складних умовах в абразивному середовищі, виготовляють зі сталі 110Г13Л або зі звичайної вуглецевої сталі з напивною на робочі поверхні зносостійких сплавів [18,20,21].

Технічні характеристики типових дробарок ударної дії наведені у додатках.

2.3.3. Дробарка молоткова ГТДРМ (рис. 2.9, фірма ТМ GRANTECH) застосовується для тонкого подрібнення легковагих матеріалів для ТБП [20]:

- відходів АПК (солони, стебел), що надходять після первинного подрібнювача;
- деревини (тріски, стружки) після подрібнювача або деревостружкової машини;
- лузга соняшника, гречки, проса, рису, кормових сумішей тощо.

Розмір фракції вихідної сировини має бути до 50 мм, вологістю не більше 14 %. Продуктивність дробарки залежить від виду і властивостей сировини, крупності

подрібненої фракції, яка залежить від розміру вічок вживаних сит і становить 3-6 мм. Чим більший діаметр отворів у ситі і менша вологість, тим більша продуктивність [20].

Перевагами даних молоткових дробарок є такі фактори:

- висока продуктивність при порівняно низькому енергоспоживанні;
- адаптація дробарки під різні види сировини з урахуванням її властивостей;
- велика площа ситової поверхні і завантажувального вікна;
- простота і компактність конструкції;
- низькі поточні витрати, швидка заміна сит і молотків;
- довговічність: ретельно збалансований ротор і реверс його обертання;
- висока надійність і безпека експлуатації.

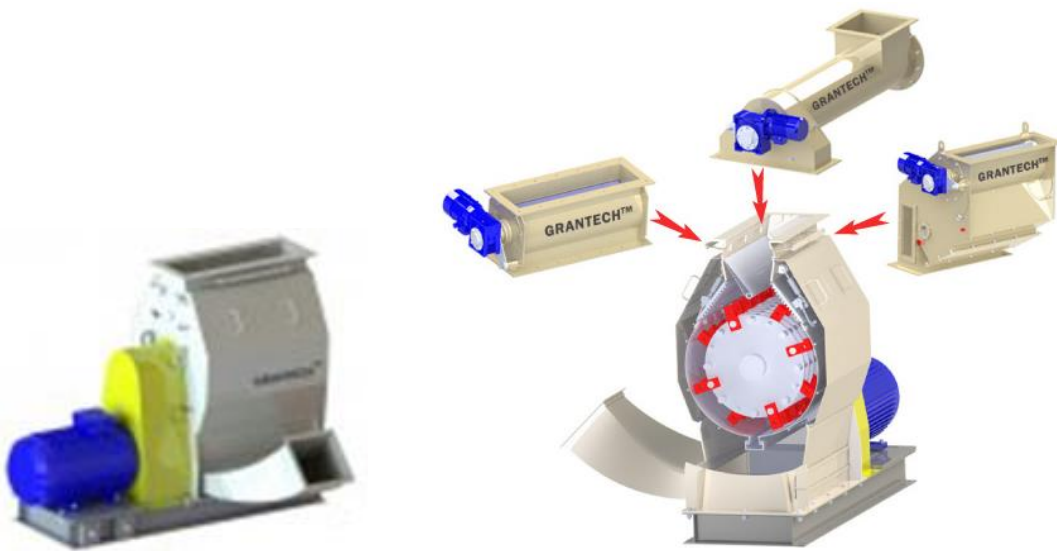


Рис. 2.9. Молоткова дробарка універсальна ГТДРМ

Таблиця 2.5. Технічні характеристики типорозмірів дробарок ГТДРМ

Модель	ГТДРМ-0,7/55	ГТДРМ-0,7/55-1	ГТДРМ-0,7/55-2	ГТДРМ-0,7/55-3
Вид живильника	-	ГТД-1 (шлюзовий)	ГТД-2 (шнековий)	ГТД-3 універсальний
Маса, не більше, кг	1600	1900	2200	2200
Габаритні розміри (ВхLxН), мм	2100x1500x1550	2100x1500x1950	2100x2980x2220	2100x1950x2600
Окружна швидкість молотків ротора, м/с	80			
Діаметр ротора, мм	700			
Частота обертання ротора, об/хв.	1800			
Продуктивність*, т/год.	до 3			

Сумарна встановлена потужність, кВт	55	57,2
-------------------------------------	----	------

2.3.4. Подрібнювачі тріски, стружки та ін. у тирсу. Спеціального обладнання для виготовлення тирси в промисловості немає. Можна використовувати існуючі моделі дробарок з незначною доробкою.

2.3.4.1. Млин молотковий ММ-03А-С призначена для подрібнення деревних стружок після станків типу ДС. Параметри млина:

- продуктивність при вологості стружки 12-15 %, т/год.	- 2
- розмір отворів сита, мм	- 12x31
- довжина ротора (робоча)	- 708
- частота обертання ротора, хв. ⁻¹	- 1500
- потужність привода, кВт	- 55
- маса конструкційна, кг	- 2710
- габарити, мм	- 2,6x0,9x1,1.

2.3.4.2. Молоткові дробарки ДМ-4 і ДМ-7 призначені для остаточного подрібнення стружки і дрібних кускових відходів. Основні параметри дробарок:

	ДМ-4	ДМ-7
- продуктивність на сухій стружці, кг/год.	3000	1500
- кількість молотків на роторі, шт.	702	448
- частота обертання ротора, хв. ⁻¹	900	980
- ширина камери дроблення, мм	960	1000
- розміри отворів сит, мм	12x30	6x60
- маса, кг	4900	3200
- габарити, м	4x2,3x1,2	2,2x1,7

2.3.4.3. Дробарка ДМ-8 призначена для переробки крупних деревних відходів розмірами не більш 60x10x5 мм у тирсу і дрібну стружку:

- продуктивність, кг/год., при W до 10 % на ситах: 5x5 мм	- 6000
3x3 мм	- 3200
- діаметр барабана, мм	- 1200
- ширина барабана, мм	- 525
- частота обертання барабана, хв. ⁻¹	- 990
- частота обертання крильчатки, хв. ⁻¹	- 50
- маса, кг	- 6900

Після подрібнення дрібні фракції крізь сита відсмоктуються пневмомеханічними засобами.

2.3.5. Молоткові подрібнювачі різного призначення і різних конструктивних рішень набули широкого розповсюдження в сільському господарстві, комбікормовій промисловості. Відомі типорозміри молоткових подрібнювачів, наприклад, КДУ-2, ДКМ-5, ДМ-Ф-4, ДБ-5, ДМБ-М, ДЗ-Т-1, ДЗК-1, ІЗК-Ф-1, ИРМ-50, ИРТ-80 та ін. Можливість їх застосування у твердопаливних лініях для отримання подрібненої деревної тирси заслуговує проведення порівняльного аналізу. Розглянуто базові зразки молоткових дробарок, як технічно самостійних машин. За результатами короткого аналізу [20,22,24,27] згаданих дробарок ударної дії складено таблицю, що додатку Г, розроблена класифікація цього типу машин, що в презентації.

Аналіз свідчить, що **дробарки з ситовим днищем (колосниковими решітками)** не забезпечуватиме остаточного тонкого подрібнення деревного матеріалу, коли відсоток вмісту в здрібненій масі частинок розміром вище заданих 4 мм перевищений, або коли сировина, що піддається подрібненню, має велику вологість понад 15 %, у зв'язку з чим ефект дроблення ударом виходить мінімальним. Деревний матеріал подрібнюється ударами молотків, що обертаються з швидкістю 30-70 м/с, об рифлену поверхню і стиранням його між молотками [18,20,21,25].

До **недоліків** цього типу **дробарок** належать швидке зношення молотків, відбійних плит, колосникових решіток (сит), злипання отворів решіток при подрібненні підвищеної вологості (до 15 %) пластичних матеріалів м'яких порід дерев, складність монтажу (демонтажу) і балансування ротора [18,20,21].

Колосникові решітки (сита) займають від 80° до 180° нижньої частини кола ротора. Конструкція решіток повинна дозволяти змінювати їх положення відносно ротора, для налаштування дробарки на задану величину 1-5 мм подрібненої тирси, а також для компенсації зношення молотків і колосників. У зв'язку з цим решітки роблять поворотними і підймальними, але в деяких конструкціях дробарок вони виконуються нерухомими, що є істотним недоліком таких дробарок [18,21,24,26].

При дробленні деревних матеріалів вологістю понад 10 % відбійні плити робляться, головним чином, без рифів, оскільки в рифах запристрійовується подрібнений матеріал, що знижує ефективність дроблення об плиту [18,21,24,26].

При зносі молотків відстань між їхньою зовнішньою крайкою і внутрішньою поверхнею ситового барабана збільшується, унаслідок чого деревна біосировина неефективно подрібнюється, а витрата енергії на подолання тертя збільшується. Крім того, при надмірному і нерівномірному зносі молотків порушується балансування ротора і виникає вібрація, що викликає руйнування машини [23,25-28].

Молоткові дробарки **без колосникових решіток (безрешітні)** забезпечують отримання рівномірного дроблення деревини завдяки багатократній ударній дії молотків за час проходження деревної біомаси через дробарку [20,24,26,27].

Отже, визначивши за результатами аналізу напрямки подальшої розробки і застосування для остаточного подрібнення деревних матеріалів у прийнятих технологічних лініях господарства (див. розд. 1) типу молоткових **безрешітних** дробарок, розглянемо конструкції та процеси ряду існуючих подрібнювачів.

2.3.5.2 Дробарка ДМБ-М (рис. 2.11) призначена для подрібнення всіх видів сипких матеріалів [20,22,27]. Процес подрібнення відбувається без решіт у прямооточному режимі.

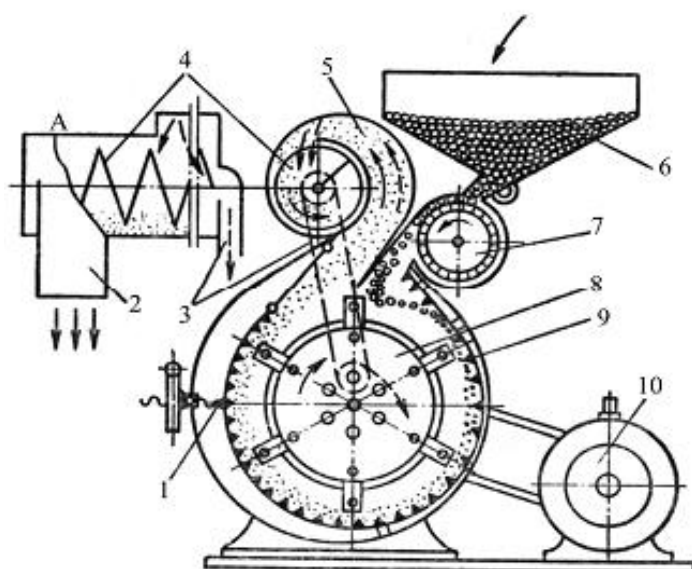


Рис. 2.11. Функціональна схема безрешітної дробарки ДМБ-М:

1–механізм регулювання ступеня подрібнення; 2–вивантажувальний рукав; 3–патрубок для циркуляції повітря; 4–вивантажувальний шнек; 5–циклон; 6–бункер; 7–дозатор; 8–ротор молотковий; 9–дека; 10–електродвигун

Дробарка складається з бункера 6, дозуючого пристрою 7, камери

подрібнення з молотковим ротором 8, горизонтального циклона 5 та привода. Камера подрібнення має два вікна: завантажувальне, з'єднане з завантажувальним лотком та вивантажувальне, під'єднане до циклона. На внутрішній поверхні камери знаходяться секції рифлених дек 9, які відрізняються між собою кроком між рифами та відстанню до молотків, за ходом руху матеріалу зазор зменшується. Переміщення крайніх дек здійснюється механізмом регулювання ступеня подрібнення 1. Канал виводу подрібненого матеріалу з циклона виконаний у формі завитка, при цьому вісь циліндра циклона і вивантажувального шнека зміщені. Циклон має вивантажувальну горловину 2 з тканинним рукавом, а з протилежної сторони циклом під'єднаний до камери подрібнення патрубком 3 для циркуляції повітря.

2.4. Вибір перспективного типу молоткової дробарки

За результатами аналізу встановлено, що найбільш сприятливими засобами для подрібнення біомаси для виробництва твердого палива буде дробарка фірми Грантех марки GTI-10 з ситовим днищем та роторним механізмом із 8 молотків (рис. 2.12).

Загальний вигляд цієї дробарки наведено в презентації.

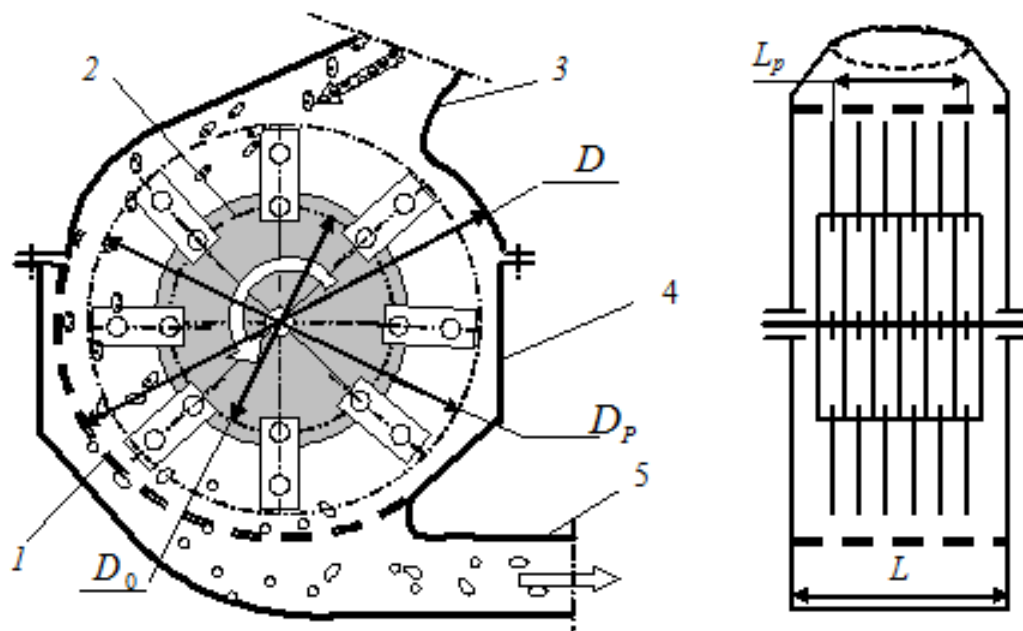


Рис. 2.12. Конструктивно-технологічна схема перспективної дробарки:

1 – сито; 2 – ротор; 3, 5 – живильний і відвідний трубопроводи; 4 – камера дробильна

Розділ 3.

ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ БІОМАСИ

3.1. Дослідження процесу подрібнення біоматеріалів у молоткових дробарках

Аналітичний опис робочого процесу решітних і безрешітних молоткових дробарок є передумовою обґрунтування технологій і засобів для подрібнення сипучих органічних матеріалів. З метою удосконалення процесу подрібнення біомаси, що здійснюється машинами ударної дії, першочерговим завданням є обґрунтування механізму деформації та руйнування рослинних матеріалів ударним навантаженням. У зв'язку з цим встановлено, що експериментальні залежності напруження відносної деформації можна визначити на основі теорії реології з урахуванням простих механічних моделей, фізичні закони яких відомі [11,12,13]. При цьому вказані залежності можна зображувати у вигляді механічних моделей [14], складених у різних комбінаціях лише із пружних і в'язких елементів.

Порівняльний аналіз аналітичних і експериментальних залежностей напруження відносної деформації свідчить, що одержані реологічні рівняння при данному моделюванні можуть описувати поведінку механізму деформації і руйнування рослинних матеріалів в умовах їх ударного навантаження з достатньою точністю для практики. Усі одержані реологічні й реологічно-хвильові залежності знаходяться у задовільній відповідності з аналогічними експериментальними залежностями, розбіжність між якими не перевищує 3-5 % [15].

Отже метою даного розділу є необхідність встановити аналітично-функціональний зв'язок між параметрами процесу подрібнення рослинних матеріалів у решітних і безрешітних молоткових дробарках на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень і законів класичної механіки.

В якості об'єкта наукових досліджень [16] були дослідні зразки решітних і безрешітних молоткових дробарок. Усі дослідні зразки розроблені і виготовлені на

основі теоретичних, експериментальних і патентних досліджень [17, 18]. Крім того, до об'єкта досліджень входили основні види рослинних матеріалів кондиційної (12-14 %) і підвищеної вологості (18-40 %), а також качани кукурудзи молочно-воскової і технічної стиглості, зернові матеріали олійних культур і гречана лузга.

Проаналізовано процес подрібнення рослинних матеріалів у прямоточних безрешітних молоткових дробарках. Щоб забезпечити максимальну ефективність і надійність технологічного процесу вказаних дробарок на основі аналізу результатів експериментальних досліджень було встановлено [15, 17 – 19], що довжина (l_k) потоку робочої маси повинна дорівнювати довжині (l_m) робочої поверхні дробильної камери, а відношення кожної із них до свого радіуса відповідно R_k і R_m і відношення колової швидкості на кінцях молотків до середньої колової швидкості потоку робочої маси повинні складати однакову і постійну величину, яка дорівнює числу 5 при оптимальному робочому режимі. При цьому, враховуючи технологічні і конструктивні складнощі по створенню суцільного і рівномірного потоку робочої маси по колу дробильної камери, з практичної і теоретичної точок зору приймаємо, що середній радіус потоку робочої маси (R_k) дорівнює радіусу ротора (R_m).

Щоб забезпечити умови стандарту за крупністю подрібнення для усіх типорозмірів прямоточних безрешітних молоткових дробарок, необхідно для кожної із них визначити оптимальну ширину дробильної камери з урахуванням їх продуктивності. Для цього теоретично і експериментально встановлено, що продуктивність вказаних дробарок змінюється пропорційно ширині дробильної камери. При цьому оптимальна ширина дробильної камери дорівнює 50 мм на одну тону продуктивності за годину, що виражає питому ширину дробильної камери, яку можна визначити за формулою:

$$b_k = \frac{B_k}{m_t}, \quad (3.1)$$

звідки $B_k = m_t b_k$ (3.2)

або $m_t = \frac{B_k}{b_k}$ (3.3)

де b_k - питома ширина дробильної камери, м.с/кг.

За формулою (3.1) питома ширина дробильної камери дорівнює: $b_k = 0,18$ м с/кг. За формулою (3.2), задавши продуктивність дробарки, визначено ширину дробильної камери і навпаки, за формулою (3.3), задавши ширину дробильної камери, визначено продуктивність дробарки.

Крім того, щоб забезпечити необхідну крупність подрібнення з урахуванням максимальної твердості рослинних матеріалів за фізико-механічними властивостями, мінімальна колова швидкість на кінцях молотків, особливо для прямоточних безрешітних молоткових дробарок, повинна бути не менше 60 м/с. В цьому випадку експериментально встановлено, що мінімальний радіус ротора повинен бути 0,2 м при частоті його обертання не менше 2800-3000 об/хв.

Теоретично і експериментально встановлено, що для будь-якого типорозміру прямоточної безрешітної молоткової дробарки при радіусі молоткового ротора в межах 0,2-0,3 м і при оптимальному робочому режимі дробарки середня колова швидкість потоку рослинної маси у дробильній камері у середньому у 5 разів менша, ніж колова швидкість на кінцях молотків. Таке зменшення середньої коллової швидкості потоку робочої маси відбувається за рахунок суттєвого гальмування його реберною декою дробильної камери. Це дозволяє збільшити кількість і інтенсивність ударів молотками по технологічній масі, що забезпечує можливість досягнення необхідної крупності подрібнення за один прохід робочої маси через дробильну камеру.

В цьому випадку кількість ударів молотками по технологічній масі залежить від величини її гальмування, частоти обертання молоткового ротора за секунду, кількості молотків на роторі і часу, за який кінці молотків проходять довжину робочої поверхні дробильної камери. При цьому для решітних і безрешітних молоткових дробарок одержані формули, які для визначення кількості ударів молотками по технологічній масі, мають вигляд:

$$K_{y\partial} = \frac{V_M n_M}{V_{cp} 60} Z_M \tau_M. \quad (3.4)$$

або

$$K_{y\partial} = \frac{l_M \tau_k n_M}{\tau_M l_k 60} Z_M \tau_M, \quad (3.5)$$

звідки

$$K_{y\partial} = \frac{l_M \tau_k n_M}{\tau_M l_k 60} Z_M \tau_M, \quad (3.6)$$

Для безрешітних молоткових дробарок, де $l_m = l_k$, формула (3.6) приймає вигляд:

$$K_{y\partial} = \frac{n_m}{60} Z_m \tau_k, \quad (3.7)$$

де $K_{y\partial}$ - кількість ударів молотками по технологічній масі;

Z_m - кількість молотків на роторі, шт.

Кількість ударів одним молотком по технологічній масі за час перебування її у дробильній камері визначається за формулою:

$$K'_{y\partial} = \frac{K_{y\partial}}{Z_m}, \quad (3.8)$$

звідки: для решітних молоткових дробарок

$$K_p = \frac{l_m}{l_k} x \frac{n_m}{60} \tau_k; \quad (3.9)$$

для прямоточних безрешітних молоткових дробарок:

$$K_{\sigma} = \frac{n_m}{60} \tau_k. \quad (3.10)$$

Для можливості аналітичного описування і практичного керування робочим процесом прямоточних безрешітних молоткових дробарок, необхідно вивчити, яким чином зв'язані між собою основні параметри даного процесу. Для цього експериментально встановлено, що на зміну модуля подрібнення суттєво впливають усі параметри робочого процесу. Тому, з практичної точки зору, функціональний зв'язок вказаних параметрів відносно модуля подрібнення можна виразити у спрощеному вигляді:

$$M = Kh_3W, \quad (3.11)$$

де M - модуль подрібнення, мм;

K - постійне безрозмірне число;

h_3 - зазор між кінцями молотків і робочою поверхнею дробильної камери, мм;

W - вологість вихідного матеріалу, %.

Із аналізу формули (3.11) можна зробити висновок про те, що для реального підтвердження функціонального зв'язку параметрів даного процесу подрібнення формула (3.11) має включати постійне число 2. Це пов'язано з тим, що при зміні модуля подрібнення змінюються по-різному усі параметри процесу таким чином, що їх відношення завжди дає постійне число 2. Тоді формула (3.11) приймає вигляд:

$$M = 2h_3W. \quad (3.12)$$

В ході наступних розрахунків необхідно знайти таке функціональне відношення параметрів процесу подрібнення, яке дорівнюватиме числу 2.

Підставивши у формулу (3.12) замість числа 2 відношення основних параметрів процесу, одержимо формулу:

$$M = \frac{m_t m_1 V_{cp} h_3 W}{N_1 \tau_m B_n n_{cp} D_{cp}}. \quad (3.13)$$

На наступному етапі дослідження необхідно визначити аналітично середню колову швидкість потоку біомаси у дробильній камері решітних молоткових дробарок, у яких більша частина потоку біосировини їде на повторні обертання, утворюючи циркуляцію у дробильній камері, що призводить до зменшення продуктивності дробарки, збільшення енергоємності та металоємності процесу, ускладнення конструкції і погіршення екологічних умов. У цьому випадку потрібно знати кількість біомаси і час, який вона перебуває у дробильній камері, а також її усереднену довжину потоку при заданій продуктивності дробарки. Для цього першочергово використовуємо закономірність [20], яка передбачає зв'язок між решітними і безрешітними молотковими дробарками.

За рахунок циркуляції робочої маси у дробильній камері решітних молоткових дробарок продуктивність їх значно зменшується у порівнянні з безрешітними молотковими дробарками. При цьому середня товщина (h'_{cp}) потоку робочої машини (m'_t) у дробильній камері зменшується на однакову величину двічі, де один раз за рахунок зменшення продуктивності дробарки (m'_t), а другий – за рахунок збільшення середньої довжини (l'_k) потоку біомаси.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що параметри технологічного процесу решітних і безрешітних молоткових дробарок мають між собою аналогічний функціональний зв'язок. Тому потрібно сформулювати вираз (3.13) так, щоб використати його для опису процесу як решітних, так і безрешітних молоткових дробарок. Для цього необхідно підставити у (3.13) замість змінних параметрів аналогічні значення технологічного процесу для решітних молоткових

дробарок $(m'_1, m'_t, V'_{cp}, l'_k, h'_{cp}, D'_{cp})$. Крім того, замість вказаного зазору (h_3) для безрешітних молоткових дробарок підставити змінний параметр: діаметр отворів решета (d). При цьому одержимо аналогічну формулу опису технологічного процесу решітних молоткових дробарок, яка має вигляд:

$$M = \frac{m'_t m'_1 V'_{cp} d W}{N_1 \tau_m B_k h'_{cp} D'_{cp}}, \quad (3.14)$$

де d - діаметр отворів решета решітної молоткової дробарки, мм.

Формулу (3.14) можна виразити у більш простому вигляді:

$$M = 2dW. \quad (3.15)$$

За формулою (3.15) при заданому модулі подрібнення і при даній вологості вихідного матеріалу можна визначити необхідний діаметр отворів решета і навпаки, за встановленим діаметром отворів можна визначити величину модуля подрібнення.

За результатами розрахунків по формулі (3.13) побудовані графічні залежності (рис. 3.1) і номограма (рис. 3.2) для визначення функціонального зв'язку між параметрами робочого процесу прямої безрешітної молоткової дробарки.

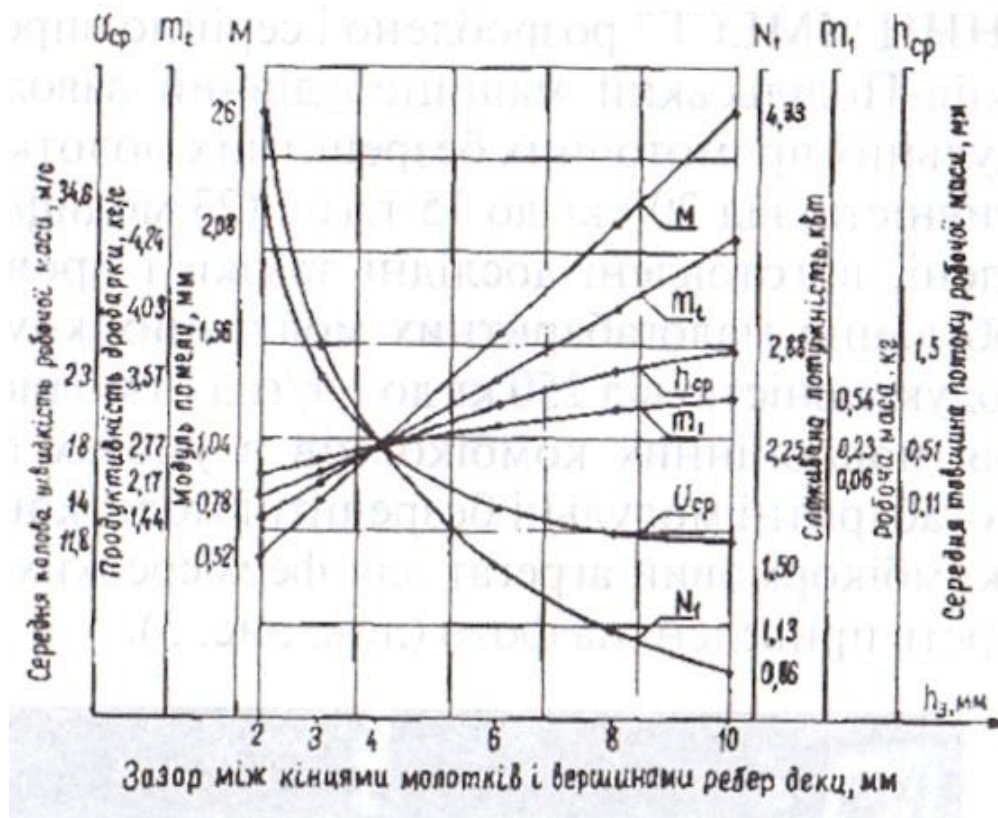


Рис. 3.1. Залежності $M, m_t, m_1, V_{cp}, n_{cp}$ від кількості молотків n_3 при $N_1 = const$; залежності N_1 і M від n_3 при $m_t = const$

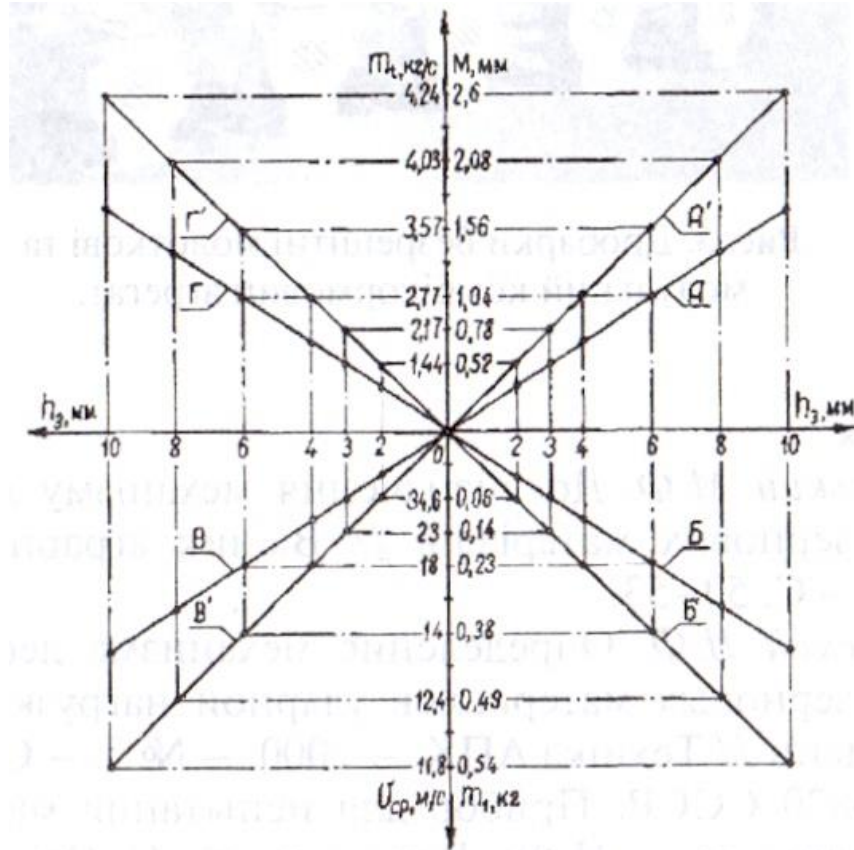


Рис. 3.2. Номограма для визначення параметрів (M, m_t, m_1, V_{cp}) технологічного процесу молоткової дробарки при оптимальній споживаній потужності зі зміною зазору (h_3) між кінцями молотків і поверхнею дробильної камери

Залежності A, B, B', G виражають змінювання відповідних параметрів на однакову величину за рахунок змінювання вказаного зазору (h_3), а залежності A', B', B', G' тих же параметрів, які додатково змінюються за руханок одночасного змінювання на однакову величину продуктивності дробарки (m_t).

На теперішній час вітчизняні науково-дослідні установи та машинобудівні підприємства [16] створили понад двох десятків модифікацій прямоточних молоткових дробарок продуктивністю від 200 кг до 15 т/год.

3.2. Методика технологічного розрахунку молоткової дробарки

3.1.1. Основи розрахунків молоткової дробарки.

У дробарках ударної дії матеріал руйнується під дією механічного удару, при якому кінетична енергія рухомих

тіл повністю або частково переходить в енергію їх деформації і руйнування. В результаті удару билем або молотком частинка матеріалу руйнується, її осколки розлітаються і відкидаються на колосникові грати, створюючи камеру подрібнення. Ударяючись об колосникові грати, матеріал додатково подрібнюється і, відбиваючись, знову потрапляє під дію ротора. Це повторюється багато разів, поки частки матеріалу, досягнувши певних розмірів, не вийдуть крізь колосникові грати на розвантаження.

В деяких випадках матеріал, отримавши удар, починає обертатися довкола свого центру тяжіння з швидкістю, близькою до швидкості робочого органу дробарки, і руйнується, оскільки при цьому від дії відцентрових сил в шматку матеріалу виникає напруження, яке перевищує межу міцності при розтягуванні матеріалу (наприклад, біомаси впоперек волокон).

Удар по шматку матеріалу у дробарках ударної дії за природою тіл, що співударяються, займає проміжне положення між пружним і непружним ударом.

Критичний розмір шматка матеріалу, при якому починається його руйнування, визначається за експериментальною формулою [12]:

$$d_{2кр} = 230 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\sigma_p}{\rho \cdot v_p^{1,5}}, \quad (3.16)$$

де $d_{2кр}$ – критичний діаметр матеріалу, що подається на подрібнення, м;

v_p – швидкість удару, що дорівнює лінійній швидкості ротора, м/с;

σ_p – границя міцності матеріалу при розтягуванні, Па, Н;

ρ – щільність матеріалу, що подрібнюється, кг/м³

Якщо шматок матеріалу буде мати розмір, менший за критичний, то при даних умовах він не піддається подрібненню.

Для молоткових дробарок основним критерієм для розрахунків є критична лінійна швидкість молотка, при якій можливе руйнування матеріалу заданої величини. Швидкість ротора вибирається залежно від заданого максимального розміру продукту подрібнення і характеристики матеріалу - границі міцності матеріалу при розтягуванні і його щільності [6]:

$$v_{кр} = 0,0175 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_p}{\rho \cdot d_2}\right)^2}, \quad (3.17)$$

де $v_{кр}$ – критична лінійна швидкість ротора, при якій можливе руйнування матеріалу заданої величини, м/с;

d_2 – діаметр матеріалу, що подається на подрібнення, м.

Щільність соломи ворохом становить 20-50 кг/м³, лушпиння соняшнику і гречки – 110-130 кг/м³, шкарлупи горіхів – 700 кг/м³.

Знаючи мінімально необхідну для руйнування матеріалу лінійну швидкість молотка, можна визначити необхідну для руйнування частинки матеріалу кутову швидкість молотка як [3]:

$$\omega = \frac{v}{R_{max}}, \quad (3.18)$$

де ω – необхідна для руйнування частинки матеріалу кутова швидкість молотка, рад/с; R_{max} – радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка, м.

Радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка R_{max} визначається відповідно до конструктивних розмірів молотка. Для цього необхідно задатись такими конструктивними розмірами молотка, як довжина a , ширина b і товщина δ .

Тоді відстань від центра маси молотка до осі отвору (при умові одного отвору на молотку) визначається як [23]:

$$c = \frac{a^2 + b^2}{6 \cdot a}, \quad (3.19)$$

де c – радіус від центра маси молотка до осі отвору, м; a – довжина молотка, м; b – ширина молотка, м.

Щоб на вал підшипника дробарки не передавалися ударні імпульси від молотків, квадрат радіусу інерції молотка r_c відносно його точки підвісу до диска повинен визначатися як [23]:

$$r_c^2 = \frac{a^2 + b^2}{12}, \quad (3.20)$$

де r_c – радіус інерції молотка відносно його центру маси, м.

Радіус інерції молотка відносно осі його підвішування буде [3]:

$$r = \sqrt{r_c^2 + c^2}, \quad (3.21)$$

де r – радіус інерції молотка відносно осі його підвішування, м.

Відстань від кінця молотка до осі його підвішування становить [23]:

$$l = c + 0,5 \cdot a, \quad (3.22)$$

де l – відстань від кінця молотка до осі його підвішування, м.

Після цього вибирається відстань від осі підвішування молотка до осі ротора. Вибір проводиться виходячи із умови, що стійка робота молоткових дробарок спостерігається при умові нерівності відстаней від осі підвішування молотка як до його зовнішньої робочої кромки, так і до осі ротора. При цьому відстань від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 повинна бути більшою від відстані від осі його підвішування до кінця молотка l ($R_0 > l$) [23].

Знаючи відстань від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 та відстань від кінця молотка до осі його підвішування l , визначається радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка, яка необхідна для розрахунку кутової швидкості молотка за формулою (3.3) [31]:

$$R_{\max} = R_0 + l, \quad (3.23)$$

де R_{\max} – радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка, м; R_0 – відстань від осі підвішування молотка до осі ротора, м; l – відстань від кінця молотка до осі його підвішування, м.

Знаючи кутову швидкість молотка, можна визначити відцентрову силу його інерції [23]:

$$P_m = m_m \cdot \omega^2 \cdot R_c, \quad (3.24)$$

де P_m – відцентрова сила інерції молотка, Н;

m_m – маса молотка, кг;

R_c – радіус кола розміщення центру маси молотків, м.

Молотки дробарок виготовляються із сталі. Маса такого молотка визначається за формулою [23]:

$$m_m = V_m \cdot \rho_m = a \cdot b \cdot \delta \cdot \rho_m, \quad (3.25)$$

де V_m – об'єм молотка, м³;

ρ_m – щільність матеріалу, з якого виготовлений молоток, кг/м³.

Молотки виготовляються із сталі, щільність якої становить 7850 кг/м³.

Радіус кола розміщення центру маси молотків визначається за формулою [23]:

$$R_c = R_0 + c, \quad (3.26)$$

Діаметр осі підвішування молотка визначається як [22; 31]:

$$d = 1,36 \cdot \sqrt[3]{P_m \cdot \delta / \sigma_m}, \quad (3.27)$$

де d – діаметр осі підвішування молотка, м;

δ – товщина молотка, м;

σ_m – допустима напруженість на вигин, Па.

Допустима напруженість на вигин приймається із довідкової літератури.

Товщина диска визначається за формулою [23; 31]:

$$\delta_d \geq \frac{P_m}{d \cdot \sigma_{дон зм}}, \quad (3.28)$$

де δ_d – товщина диска, м;

$\sigma_{дон зм}$ – допустима напруженість на зминання, Па.

Допустима напруженість на зминання приймається із довідкової літератури.

Зовнішній радіус диска визначається як [23]:

$$R = R_0 + 0,5 \cdot d + h_{мін}, \quad (3.29)$$

де R – зовнішній радіус диска, м.

Мінімальний розмір перемички між отворами під осі підвішування і зовнішньою кромкою диска повинен бути [23]:

$$h_{мін} \geq \frac{0,5 \cdot P_m}{\delta \cdot \sigma_{зр}}, \quad (3.30)$$

де $h_{мін}$ – мінімальний розмір перемички між отворами під осі підвішування і зовнішньою кромкою диска, м; $\sigma_{зр}$ – допустима напруга на зріз, Н.

Допустима напруженість на зріз вираховується за формулою [23]:

$$\sigma_{\text{дон зр}} = (0,2 \dots 0,3) \cdot \sigma_m, \quad (3.31)$$

де σ_m – границя текучості, Па.

Значення границі текучості σ_m для різних марок сталі представлені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Границі текучості різних марок сталі [7]

Марка сталі	Границя текучості, МПа
08X18H10	196
08X18H10T	196
17X18H9	215
10X17H13M2T	215
20X25H20C2	295
38X18H25C2	345
03X18H5AG4	297
X18H5AG4	297-362
X18AH10	311-424
X18H10	245
X18AH11	408-415
X25AH10	429-457
Ст1пс	190-220
Ст2	200-230
Ст3	210-250
Ст4	240-270
Ст5	260-290
Ст6	300-320
S355	355
A11	309
AC14	390
40X	490
30XГСА	1140

Діаметр ротора дробарки визначається як подвоєна сума відстані від кінця молотка до осі його підвішування l і відстані від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 [23]:

$$D_p = 2(R_0 + l), \quad (3.32)$$

де D_p – діаметр ротора дробарки, м.

Довжина ротора дробарки визначається залежно від його діаметра [23]:

$$L_p = (0,8 \dots 1,2) D_p, \quad (3.33)$$

де L_p – довжина ротора дробарки, м.

Кількість молотків залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Велика кількість ярусів уповільнюватиме проходження матеріалу через робочу зону і, кінець кінцем, позначатиметься на продуктивності. Також може постраждає якість подрібнення – можлива поява ефекту переподрібнення. При малому ж числі молотків спостерігатиметься проскакування часток матеріалу і, як наслідок, внаслідок малої дії на матеріал, він не досягатиме необхідної міри дроблення. Звичайно необхідну кількість молотків встановлюється дослідним шляхом. Мінімальна кількість має бути не менше 2, аби зрівноважити вал ротора.

Продуктивність дробарки визначається за формулами [23,24]:

$$P = 480 \cdot \frac{D_p^{1,5} \cdot L_p}{v_p^{0,35} \cdot z^{0,5}} \cdot K_\beta, \quad (3.34)$$

де P – продуктивність дробарки, м³/год;

v_p – лінійна швидкість обертання ротора, м/с;

z – число рядів молотків; K_β – коефіцієнт, що залежить від положення відбійної плити.

При роботі дробарки з опущеною відбійною плитою $K_\beta=1,3$, а при повністю піднятою відбійною плитою – $K_\beta=5,2$ [2].

Частота обертання ротора n визначається відповідно до відомої кутової швидкості молотка [3]:

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi}, \quad (3.35)$$

де n – частота обертання ротора, об/хв.

Потужність двигуна дробарки визначається за формулою [10]:

$$N = \frac{(0,1 \dots 0,15) \cdot P \cdot i \cdot \rho}{1000}, \quad (3.36)$$

де N – потужність двигуна дробарки, кВт;

P – продуктивність дробарки, т/год;

i – ступінь подрібнення матеріалу;

ρ – щільність матеріалу, що подрібнюється, кг/м³.

Ступінь подрібнення i характеризується відношенням розміру D_m частинок матеріалу до подрібнення до розміру d_m частинок після подрібнення [34]:

$$i = \frac{D_m}{d_m}, \quad (3.37)$$

де D_m – розмір шматків матеріалу до подрібнення, м;

d_m – розмір шматків матеріалу після подрібнення, м.

Вибір розміру вихідної щілини колосників відбувається наступним чином. Розрахунковим шляхом встановлено, що за один удар частинка матеріалу не дробиться на частки, менші критичного розміру. Необхідно не менше трьох центральних ударів, аби всі частки продукту дроблення були б не більше критичного розміру. З цією метою в роторній дробарці передбачено декілька камер, в яких продукт послідовно подрібнюється до заданих розмірів. Досліди показують, що розміри шматків, що пройшли через вихідну щілину в колосникових решітках досягають 1,5-1,7 величини зазору в колосниках. Тому величина вихідної щілини колосників визначається за формулою [32]:

$$s_k = \frac{d_{\max}}{1,5 \dots 1,7}, \quad (3.38)$$

де s_k – величина вихідної щілини колосників, м; d_{\max} – максимальний розмір подрібненого матеріалу, м

Діаметр валу в небезпечному перетині біля шківів знаходиться за формулою:

$$d_0 = 0,052 \cdot \sqrt{\frac{N}{\omega}}, \quad (3.39)$$

де d_0 – діаметр валу в небезпечному перетині біля шківів, м;

N – потужність двигуна дробарки, кВт;

ω – кутова швидкість ротора, рад/с.

Наступним є розрахунок молотка на міцність.

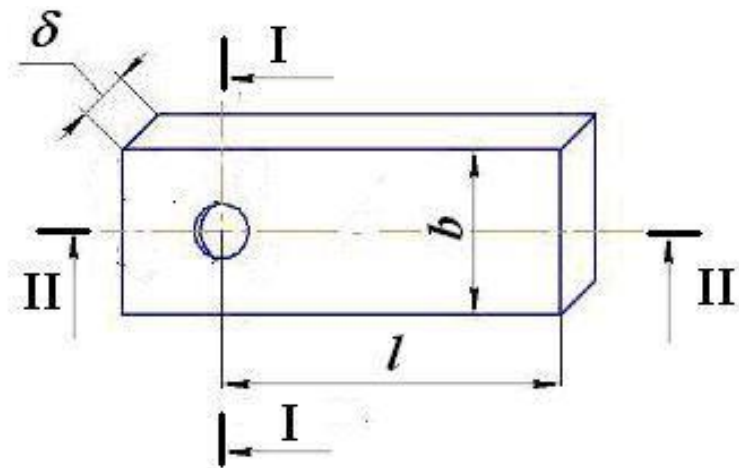


Рис. 3.3. Схема для розрахунку напружень

Напруженість, що виникає в перетині I-I молотка становить:

$$\sigma_{I-I} = \frac{P_m}{(b-d) \cdot \delta}, \quad (3.40)$$

Допустима напруженість в перетині I-I молотка при цьому визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{дон } I-I} = \frac{\sigma_m}{s}, \quad (3.41)$$

де $\sigma_{\text{дон } I-I}$ – допустиме напруження в перетині I-I молотка, Па;

σ_m – границя текучості, Па; s – запас міцності.

Запас міцності для молотків дробарок становить 5.

Напруженість зрушення, що виникає в перетині II-II молотка становить:

$$\sigma_{зруш\ I-I} = \frac{P_m}{2 \cdot \delta \cdot (l - b - d)}, \quad (3.42)$$

Допустима напруженість зрушення сталі становить 82 МПа.

Напруженість на зминання, що виникає в молотку, визначається за формулою:

$$\sigma_{зм} = \frac{P_m}{\delta \cdot d}. \quad (3.43)$$

3.3. Розрахунки параметрів молоткової дробарки

Найбільшого поширення набули дробарки з вільно підвішеними молотками. Дроблення матеріалу в них відбувається унаслідок ударів по ньому молотків, а також ударів і тертя часток об кожух і штаповане сито.

Розрахунок молоткової дробарки ведуть у такій послідовності:

- визначають мінімальну необхідну колову швидкість (м/с) молотка

$$V_{min} = P\tau/m,$$

де P - середня миттєва сила опору руйнуванню частки, Н;

τ - тривалість удару молотка по частці, с;

m - маса частки, що подрібнюється, кг;

- конструктивно задаються розмірами молотка (L - довжина молотка, м; B - ширина молотка, м; h - товщина молотка, м);

- задаються конструкцією молотка (найбільшого поширення набули прямокутні молотки з одним чи двома отворами).

Якщо прийнятий молоток з одним отвором:

- визначають відстань від центра ваги молотка до осі отвору

$$c = (L^2 + B^2)/6L; \quad (3.44)$$

- визначають квадрат радіуса інерції молотка щодо його центра ваги

$$r_c^2 = (L^2 + B^2)/12;$$

- визначають квадрат радіуса інерції молотка щодо його осі підвісу

$$r^2 = r_c^2 + c^2; \quad (3.45)$$

- визначають відстань від кінця молотка до його осі підвісу

$$i = c + 0,5L; \quad (3.46)$$

- перевіряють забезпеченість безударної роботи молотка за рівнянням:

$$r^2 = lc. \quad (3.47)$$

Призначають відстань від осі підвісу молотка до осі ротора. При цьому враховують, що ця відстань має бути більша за відстань від кінця молотка до його осі підвісу (щоб уникнути порушення встановленої роботи молоткової дробарки);

$$l_0 > l.$$

Радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка $l_0 > l = R$.

Кутова швидкість диска

$$\omega = v_{min}IR_1. \quad (3.48)$$

Беруть її з деяким запасом.

Відцентрова сила інерції молотків

$$P_H = m_M \omega^2 R_c, \quad (3.49)$$

де m_M - маса молотка, кг;

$$m_M = LBhr,$$

де ρ - щільність сталі, кг/м³;

R_k - радіус кола розташування центрів ваги молотків, м, ($R_c = l_0 + c$);

ω - колова швидкість, с⁻¹.

Діаметр осі підвісу молотка

$$d = 1,36 \sqrt[3]{R_H h / [\sigma]_B} \quad (3.50)$$

де $[\sigma]_B$ - припустиме напруження при вигині, мПа ($[\sigma]_B = 100$ мПа).

Товщина диска

$$\delta \geq P_H / (d[\sigma]_{зМ}), \quad (3.51)$$

де $[\sigma]_{зМ}$ - припустиме напруження при зминанні, мПа ($[\sigma]_{зМ} = 59 \dots 88$ мПа).

Визначають мінімальний розмір перемички між отворами під осі підвісу і зовнішньою крайкою диска

$$h_{min} \geq 0,5P_H(h[\sigma]_{сер}) \quad (3.52)$$

де $[\sigma]_{зр}$ - припустиме напруження на зріз, мПа, $[\sigma]_{зр}=(0,2 \dots 0,3)\sigma_T$, $\sigma_T = 0,8[\sigma]$, де σ_T - границя текучості, мПа;

$[\sigma]$ - припустиме напруження матеріалу при розтягуванні, мПа.

Зовнішній радіус диска

$$R = l_0 + 0,5d + h_{min}. \quad (3.53)$$

Діаметр валу в небезпечному перерізі шківів

$$d_0 = 0,052\sqrt[3]{N/\omega}, \quad (3.54)$$

де N - передана валом потужність, кВт.

Вал ротора, на якому кріплять диски з проміжними кільцями, виконується східчастим: перший ступінь – під шків;

другий - під підшипник;

третій - різбовий;

четвертий - під диски та кільця.

Збільшення діаметра валу від ступеня до ступеня можна орієнтовно оцінити коефіцієнтом $\frac{1,2}{d_1} \dots 1, \frac{2^n}{d_0}$, де n - кількість ступенів валу ($n = 4$).

3.4. Результати розрахунку молоткової дробарки

Визначити основні конструктивні та технологічні параметри роторної молоткової дробарки для попереднього подрібнення біомаси в лінії з виготовлення паливних гранул. Середній діаметр частинок матеріалу, що подрібнюється становить 100 мм. Середній діаметр подрібненого матеріалу – 25мм.

Будемо вважати, що дробарка здатна до подрібнення біомаси будь-якої щільності. Тому приймаємо щільність біомаси, що буде подаватись в дробарку $\rho=800$ кг/м³.

Границя міцності біомаси при розтягуванні вповдовж волокон досить висока, однак для розрахунку критичної лінійної швидкості ротора, при якій можливе

руйнування матеріалу заданої величини, практичного значення не має. Для цього застосовується границя міцності біомаси при розтягуванні впоперек волокон, що представлена в табл. 3.1. Біосировина подрібнюється, як правило, зразу після її зрізання, тобто при вологості понад 30%. Оскільки ми прийняли, що дробарка, що проектується, здатна дробити деревину будь-якої міцності, приймаємо із табл. 3.1 границю міцності біомаси при розтягуванні $\sigma_p=8$ МПа.

Приймаємо початкову швидкість руху матеріалу рівною нулю. Тоді критична лінійна швидкість молотка, при якій можливе руйнування матеріалу заданої величини, за формулою становить

$$v_{кр} = 0,0175 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{8 \cdot 10^6}{800 \cdot 0,1}\right)^2} = 37,7 \text{ м/с.}$$

Для визначення частоти обертання ротора за формулою необхідно знати кутову швидкість молотка, для чого потрібно встановити радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка.

Радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка R_{max} визначається відповідно до конструктивних розмірів молотка. Для цього задаємось такими конструктивними розмірами молотка, як довжина a , ширина b і товщина δ . Отже, приймаємо, що $a=100$ мм, $b=40$ мм, а $\delta=40$ мм.

Тоді відстань від центра маси молотка до осі отвору (при умові одного отвору на молотці) згідно виразу (3.4) буде:

$$c = \frac{0,1^2 + 0,04^2}{6 \cdot 0,1} = 0,019 \text{ м} = 19 \text{ мм.}$$

Квадрат радіуса інерції молотка відносно його центра маси відповідно до формули становить:

$$r_c^2 = \frac{0,1^2 + 0,04^2}{12} = 0,000967 \text{ м.}$$

Радіус інерції молотка відносно осі його підвішування за формулою (3.6) становить:

$$r = \sqrt{0,000967 + 0,019^2} = 0,0366 \text{ м} = 36,6 \text{ мм.}$$

Відстань від кінця молотка до осі його підвішування відповідно до формули становить:

$$l = 0,019 + 0,5 \cdot 0,1 = 0,0693 \text{ м} = 69,3 \text{ мм}.$$

Після цього вибирається відстань від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 . Вибір проводиться виходячи із умови, що стійка робота молоткових дробарок спостерігається при умові нерівності відстаней від осі підвішування молотка як до його зовнішньої робочої кромки, так і до осі ротора. При цьому відстань від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 повинна бути більшою від відстані від осі його підвішування до кінця молотка l ($R_0 > l$). Оскільки відстань від кінця молотка до осі його підвішування $l = 69,3$ мм, відстань від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 приймаємо більшою за l . Приймаємо $R_0 = 90$ мм.

Знаючи відстань від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 та відстань від кінця молотка до осі його підвішування l , визначаємо радіус найбільш віддаленої від осі ротора точки молотка за формулою (3.8):

$$R_{\max} = 0,09 + 0,0693 = 0,1593 \text{ м} = 153,9 \text{ мм}.$$

Знаючи мінімально необхідну для руйнування матеріалу лінійну швидкість молотка та відстань від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 , визначаємо необхідну для руйнування частинки матеріалу кутову швидкість молотка за формулою

$$\omega = \frac{37,7}{0,1593} = 236,6 \text{ рад/с}.$$

Молотки дробарок виготовляються із сталі. Маса такого молотка визначається за формулою і становить (щільність сталі становить 7850 кг/м^3):

$$m_m = 0,1 \cdot 0,04 \cdot 0,01 \cdot 7850 = 0,314 \text{ кг}.$$

Радіус кола розміщення центру маси молотків становить:

$$R_c = 0,09 + 0,019 = 0,109 \text{ м}.$$

Відцентрова сила інерції молотка за формулою (3.9) становить:

$$P_m = 0,314 \cdot 236,6^2 \cdot 0,109 = 1922,3 \text{ Н}.$$

Враховуючи, що допустиме напруження сталі на вигин σ_m становить 100 МПа , діаметр осі підвішування молотка становить:

$$d = 1,36 \cdot \sqrt[3]{\frac{1922,3 \cdot 0,01}{100 \cdot 10^6}} = 0,0078 \text{ м.}$$

Приймаємо, що діаметр осі підвішування молотка буде 10 мм.

Оскільки допустиме напруження сталі марки Ст 5 на зминання $\sigma_{зм}$ становить 65 МПа, товщина диска, що визначається) повинна дорівнювати або бути більшою за

$$\delta_o \geq \frac{1922,3}{0,01 \cdot 65 \cdot 10^6} = 0,003 \text{ м.}$$

Приймаємо товщину диска рівною 5 мм.

Для визначення мінімального розміру перемички між отворами під осі підвішування і зовнішньою кромкою диска необхідно знати величину допустимого напруження сталі на зріз (визначається за формулою (3.16), яке з врахуванням того, що величина границі текучості сталі марки Ст 5 становить 280 МПа (див. табл. 3.1) буде:

$$\sigma_{зр} = 0,2 \cdot 280 = 56 \text{ МПа.}$$

Тоді мінімальний розмір перемички між отворами під осі підвішування і зовнішньою кромкою диска повинен бути не меншим:

$$h_{\min} \geq \frac{0,5 \cdot 1922,3}{0,01 \cdot 56 \cdot 10^6} = 0,0017 \text{ м.}$$

Приймаємо $h_{\min}=2$ мм.

Зовнішній радіус диска за формулою (3.14) становить:

$$R = 0,09 + 0,5 \cdot 0,01 + 0,002 = 0,102 \text{ м.}$$

Приймаємо $R=105$ мм.

Діаметр ротора дробарки за виразом (3.17) визначається як подвоєна сума відстані від кінця молотка до осі його підвішування l і відстані від осі підвішування молотка до осі ротора R_0 :

$$D_p = 2(0,09 + 0,069) = 0,357 \text{ м.}$$

Приймаємо $D_p=360$ мм.

Довжина ротора дробарки визначається залежно від його діаметра за формулою.

Приймаємо, що довжина ротора дробарки буде більшою за його діаметр. Тоді:

$$L_p = 1,2 \cdot 0,36 = 0,432 \text{ м.}$$

Приймаємо $L_p = 440$ мм.

Ступінь подрібнення i характеризується відношенням розміру D_m шматків матеріалу до подрібнення до розміру d_m шматків після подрібнення і становить:

$$i = \frac{100}{25} = 4.$$

Частота обертання ротора n за формулою (3.20) визначається відповідно до відомої кутової швидкості молотка:

$$n = \frac{30 \cdot 236,6}{\pi} = 2261 \text{ об/хв} = 37,68 \text{ об/с}.$$

Кількість молотків залежить від фізико-механічних властивостей подрібнюваного матеріалу. Велика кількість ярусів уповільнюватиме проходження матеріалу через робочу зону і, кінець кінцем, позначатиметься на продуктивності. Також може постраждає якість подрібнення – можлива поява ефекту переподрібнення. При малому ж числі молотків спостерігатиметься проскакування часток матеріалу і, як наслідок, внаслідок малої дії на матеріал, він не досягатиме необхідної міри дроблення. Звичайно необхідну кількість молотків встановлюється дослідним шляхом. Мінімальна кількість має бути не менше 2, аби зрівноважити вал ротора. Ми приймаємо для дробарки, що проектується, 4 ряди молотків по 4 молотки в кожному ряді.

Оскільки довжина ротора дробарки більша за його діаметр, продуктивність дробарки визначається за формулою:

$$P = 480 \cdot \frac{0,36^{1,5} \cdot 0,44}{37,7^{0,35} \cdot 4^{0,5}} \cdot 1,3 = 8,32 \text{ м}^3/\text{Год.}$$

Потужність двигуна дробарки за формулою становить:

$$N = \frac{0,15 \cdot 8,32 \cdot 4 \cdot 800}{1000} = 4,0 \text{ кВт.}$$

Приймаємо електродвигун марки 4A100L2У3 з частотою обертання 3000 об/хв. потужністю 5,5 кВт, який має ККД 87,5%, масу – 42 кг [38].

Величина вихідної щілини колосників визначається за формулою:

$$s_k = \frac{0,025}{1,5} = 0,017 \text{ м.}$$

Після цього проводиться розрахунок валу ротора на міцність.

Діаметр валу в небезпечному перетині біля шківів буде:

$$d_0 = 0,052 \cdot \sqrt{\frac{5,5}{236,6}} = 0,0079 \text{ м} = 7,9 \text{ мм.}$$

З врахуванням ослаблення валу шпоночним пазом приймаємо $d_0 = 10$ мм.

Напруження, що виникає в перетині I-I молотка за формулою становить:

$$\sigma_{I-I} = \frac{1922,3}{(0,04 - 0,01) \cdot 0,01} = 6407527 \text{ Па} = 6,4 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження в перетині I-I молотка становить (запас міцності для молотків дробарок – 5):

$$\sigma_{\text{дон } I-I} = \frac{280}{5} = 56 \text{ МПа.}$$

Із розрахунків видно, що $\sigma_{\text{дон } I-I} > \sigma_{I-I}$, тобто існує запас міцності молотків в перетині I-I.

Напруженість зрушення, що виникає в перетині II-II молотка, становить:

$$\sigma_{\text{зруш } I-I} = \frac{1922,3}{2 \cdot 0,01 \cdot (0,069 - 0,04 - 0,01)} = 4971357 \text{ Па} = 5,0 \text{ МПа}$$

Допустима напруженість зрушення сталі становить 82 МПа.

Отже, оскільки $\sigma_{\text{зруш доп II-II}} > \sigma_{\text{зруш II-II}}$, існує запас міцності молотків в перетині II-

II.

Напруженість на зминання, що виникає в молотку, за формулою (3.28) становить:

$$\sigma_{зм} = \frac{1922,3}{0,01 \cdot 0,01} = 19222582 \text{ Па} = 19,2 \text{ МПа} .$$

Допустима напруженість на зминання, що виникає в молотку, становить 65 МПа.

Оскільки $\sigma_{зм доп} > \sigma_{зм}$, існує запас міцності молотків на зминання.

3.5. Пропозиції удосконалення конструкції молоткової дробарки

1. Передбачаємо заміну кількості рядів молотків з восьми рядів, як на прототипі (рис. 2.12), на шести рядовий подрібнювальний роторний вузол.

2. Проводимо модернізацію перфорованого днища дробарки (деки) шляхом встановлення колосникових решіт замість гладенького з круглими отворами (рис. презентація).

3. Враховуючи те, що на подрібнені біосировини робочі органи подрібнювача менш навантажені, зменшуємо товщину молотків до 6 мм замість 8 мм.

Висновки до розділу 3

1. Теоретично і експериментально встановлено, що для будь-якого типорозміру прямої безрешітної молоткової дробарки при радіусі молоткового ротора в межах 0,2-0,3 м і при оптимальному робочому режимі дробарки середня колова швидкість потоку рослинної маси у дробильній камері у середньому у 5 разів менша, ніж колова швидкість на кінцях молотків. Таке зменшення середньої коллової швидкості потоку робочої маси відбувається за рахунок суттєвого гальмування його реберною декою дробильної камери. Це дозволяє збільшити кількість і інтенсивність ударів молотками по технологічній масі, що забезпечує можливість досягнення необхідної крупності подрібнення за один прохід біомаси через дробильну камеру.

2. На основі аналізу теоретичних і експериментальних досліджень процесу подрібнення рослинних матеріалів у решітних і безрешітних молоткових дробарках визначено те, що процес подрібнення рослинної сировини у решітних дробарках є недосконалим. Цей процес включає суперечливі явища, які усуваються у прямоточних безрешітних молоткових дробарках. Тому одержати більшу ефективність і надійність технологічного процесу у решітних молоткових дробарках неможливо у порівнянні з однотипними безрешітними дробарками. Однак підвищити ефективність технологічного процесу до 25 % решітних молоткових дробарок можливо за рахунок їх техніко-технологічного удосконалення.

3. На основі формул класичної механіки та результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесу подрібнення рослинних матеріалів у решітних і безрешітних молоткових дробарках одержані когерентні формули (3.13 і 3.14), які дозволяють аналітично простіше і більш реально описувати результати їх робочого процесу і без будь-яких досліджень будувати графічні залежності для розкриття нових шляхів удосконалення його технології і практичного керування даним процесом при створенні нового покоління вказаних дробарок.

4. Аналітично встановлений загальний функціональний зв'язок між аналогічними параметрами робочого процесу решітних і безрешітних молоткових дробарок.

Розділ 4.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ

4.1. Визначення обсягу та структури витрат на виробництво продукції

Основні показники економічної ефективності твердопаливного цеху:

- виробнича програма підприємства;
- капіталовкладення;
- приведені експлуатаційні витрати;
- загальні витрати виробництва;
- собівартість продукції;
- прибуток і рентабельність підприємства;
- термін окупності капітальних вкладень.

4.2. Розрахунок капіталовкладень

Капіталовкладення включають вартість реконструкції (будівництва) виробничого приміщення, вартість обладнання, витрати на його доставку і монтаж, та інші витрати. Вони розраховуються за формулою:

$$K_n = C_{\text{б\text{y}д}} + C_{\text{обл}}, \quad (4.1)$$

де $C_{\text{б\text{y}д}}$ – вартість реконструкції твердопаливного цеху, грн.;

$$C_{\text{б\text{y}д}} = C_1 \cdot V, \quad (4.2)$$

де C_1 – вартість реконструкції 1-го м³ виробничого приміщення цеху. Для розміщення твердопаливного виробництва у господарстві виділено приміщення під реконструкцію. Балансова вартість реконструкції виробничих приміщень становить:

$$C_1 = 373 \text{ грн./м}^3;$$

V – загальний об'єм виробничого приміщення:

$$V = h \cdot S, \quad (4.3)$$

де h – висота виробничого приміщення: $h = 3$ м;

S – площа виробничого приміщення:

$$S = 220 \text{ м}^2 \text{ (проект)}; V = 3 \cdot 220 = 660 \text{ м}^3;$$

$$C_{\text{буд}} = 373 \cdot 660 = 246240 \text{ грн.}$$

$C_{\text{обл}}$ – вартість обладнання з урахуванням витрат на транспортування, монтаж і пусконаладжувальні роботи. Вартість обладнання розраховуємо за формулою:

$$C_{\text{обл}} = K \cdot B + B_{\text{пр. л.м.}}, \quad (4.4)$$

де B – ціна комплексу обладнання твердопаливного цеху, який передбачаються закупити на заводі машинобудування, м. Чернігів:

$$B = 160000 \text{ грн.};$$

K – коефіцієнт, що враховує витрати на доставку і монтаж обладнання,

$$K = 1,1;$$

$B_{\text{пр. л.м.}}$ – вартість устаткування для твердопаливного цеху:

$$B_{\text{пр. л.м.}} = (M_m \cdot C_m + D) \cdot K_n \cdot K_{\text{тр}}, \quad (4.5)$$

де M_m – маса запроєктованого устаткування: $M_m = 1280$ кг;

C_m – собівартість 1-го кг маси нового обладнання без комплектуючих виробів:

D – вартість комплектуючих покупних виробів: $D = 960$ грн.;

K_n – коефіцієнт, що враховує плановий прибуток промисловості: $K_n = 1,1$;

$K_{\text{тр}}$ – коефіцієнт, який враховує витрати на транспортування і монтаж дробарки:

$$K_{\text{тр}} = 1,1.$$

$$B_{\text{пр. л.м.}} = (480 \cdot 60 + 960) \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 36337 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{обл}} = 1,1 \cdot 160000 + 36337 = 212337 \text{ грн.}$$

$$K_n = 246240 + 212337 = 458577 \text{ грн.}$$

4.3. Розрахунок експлуатаційних витрат

Загальні експлуатаційні витрати визначають за формулою:

$$Z_{\text{заг.екс.}} = (Z_{\text{оп}} + Z_{\text{а буд.}} + Z_{\text{а обл.}} + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{то}} + Z_{\text{ел}} + Z_{\text{тар}}) \cdot K, \quad (4.6)$$

де $Z_{\text{оп}}$ – річний фонд заробітної плати, грн.;

$Z_{\text{а буд.}}$, $Z_{\text{пр}}$ – відмахування на амортизацію і поточний ремонт будівель, грн.;

$Z_{\text{а обл.}}$, $Z_{\text{то}}$ – відмахування на амортизацію і ТО обладнання, грн.

$Z_{\text{ел}}$ – витрати на електроенергію, грн.;

$Z_{\text{тар}}$ – витрати на закупівлю тари, грн.;

K – коефіцієнт, який враховує інші експлуатаційні витрати.

Річний фонд заробітної плати визначають з урахуванням кількості працюючих, тарифних ставок і нарахувань на заробітну плату:

$$Z_{оп} = \sum_I N_i \cdot C_i \cdot t_{зм} \cdot D \cdot K_n, \quad (4.7)$$

де N_i – кількість працівників i -го розряду, чол.;

C_i – годинна тарифна ставка, $^{грн}/год$;

$t_{зм}$ – тривалість робочої зміни: $t_{зм} = 8$ год.;

$K_{зм}$ – коефіцієнт змінності: $K_{зм} = 2$;

D – число днів роботи за рік: $D = 125$ днів;

K_n – коефіцієнт нарахувань на зарплату: $K_n = 1,37$.

Визначення відрахувань на амортизацію будівлі:

$$Z_{а буд.} = C_{буд.} \cdot 0,061, \text{ грн.}, \quad (4.8)$$

$$Z_{а буд.} = 246240 \cdot 0,061 = 15021 \text{ грн.}$$

Відрахування на амортизацію обладнання:

$$Z_{а обл.} = C_{обл.} \cdot 0,15, \text{ грн.}, \quad (4.9)$$

$$Z_{а обл.} = 212337 \cdot 0,15 = 31850 \text{ грн.}$$

Відрахування на поточний ремонт і обладнання:

$$Z_{то} = C_{обл.} \cdot 0,1, \text{ грн.}; \quad (4.10)$$

$$Z_{то} = 212337 \cdot 0,1 = 21234 \text{ грн.}$$

Відрахування на електроенергію:

$$Z_{ел} = E \cdot C_{ел} \cdot D \cdot K_{зм} \cdot K, \text{ грн.}, \quad (4.11)$$

де E – споживана електроенергія за зміну:

$$E = 285 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{зм.}$$

$C_{ел}$ – ціна 1-го кВт · год. : $C_{ел} = 0,29 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год.};$

K – коефіцієнт, який враховує додаткові витрати: $K = 1,05$.

$$Z_{ел} = 285 \cdot 0,29 \cdot 125 \cdot 2 \cdot 1,05 = 20663 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальні експлуатаційні витрати складають $Z_{заг.екс.} = 364670$ грн.

Витрати на закупівлю сировини становлять $Z_{сир} = 1646000$ грн.

Транспортні витрати визначаємо за формулою:

$$Z_{тр} = G \cdot S \cdot Ц_{т.км.}, \quad (4.12)$$

де S – загальний пробіг автомобіля при транспортуванні всієї продукції, км.

$$S = \frac{G \cdot K \cdot L}{G_{Г.В.А.}}, \quad (4.13)$$

де $G_{г.в.а.}$ – вантажність автомобіля: $G_{г.в.а.} = 5$ т.;

L – відстань від складів до виробництва: $L = 0,25$ км;

K – коефіцієнт, що враховує холості пробіги автотранспортних засобів: $K = 1,2$.

$$S = \frac{429.75 \cdot 1.2 \cdot 0.25}{5} = 25 \text{ км.}$$

$Ц_{т.км.}$ – питома вартість вантажоперевезень в господарстві:

$$Ц_{т.км.} = 1,2 \text{ грн/т} \cdot \text{км}$$

Тоді $Z_{тр} = 290.2 \cdot 25 \cdot 1,2 = 8708$ грн.

Розрахунок загальних витрат на виробництво

$$Z_{з.в.} = Z_{заг. експ.} + (Z_{сир.} + Z_{тр}) \cdot 1,05, \quad (4.14)$$

де $1,05$ – коефіцієнт, що враховує інші накладні витрати.

$$Z_{з.в.} = 364670 + (1646000 + 8708) \cdot 1,05 = 2102114 \text{ грн.}$$

4.4. Визначення основних економічних показників

Визначаємо рентабельність виробництва за формулою:

$$P = (П_ч / Z_{з.в.}) \cdot 100. \quad (4.15)$$

$$P = 207086 \cdot 100 / 2102114 = 9,9\%.$$

Термін окупності капіталовкладень в роках:

$$T = K_n / П_ч, \quad (4.16)$$

$$T = 458577 / 207086 = 2,2 \text{ роки.}$$

Результати розрахунків наведено у таблиці 4.1 та на слайді презентації.

Таблиця 4.1. Техніко-економічні показники роботи твердопаливного

Показники	Значення
Річна програма твердопаливного виробництва, <i>t</i>	
- по основній сировині	823
- по додатковій побічній продукції (біомасі)	153
Капіталовкладення виробництва, <i>грн.</i>	458477
Загальні експлуатаційні витрати, <i>грн.</i>	364670
Загальні витрати на виробництво, <i>грн.</i>	2102114
Собівартість продукції, <i>грн/т</i>	2685
Річний виторг продукції всього, <i>грн.</i>	2886500
Відрахування ПДВ, <i>грн.</i> (20%)	577300
Чистий прибуток, <i>грн.</i>	207086
Рівень рентабельності виробництва, %	10
Термін окупності капіталовкладень проекту, <i>роки</i>	2,2
Продуктивність праці, <i>кг/люд*год</i>	55,9

виробництва

За результатами розрахунків економічних показників отримані величини, зокрема, чистий прибуток за рік – 207 тис. грн., рівень виробничої рентабельності – 10 %, термін окупності капіталовкладень твердопаливного виробництва – 2,2 роки, свідчать прибутковість та економічну ефективність впровадження у господарстві технологічної лінії твердопаливного виробництва на базі удосконаленого подрібнювача біомаси для лінії твердопаливного виробництва у господарстві.

Розділ 5.

РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ БЕЗПЕЧНОЇ ПРАЦІ

Одним з найважливіших питань виробництва на підприємстві є забезпечення безпеки праці робітників. Тому законодавством України розроблено ряд нормативних актів і документів, які вимагають дотримання безпеки праці на виробництві.

Стан безпеки праці в загальній мірі відповідає нормам нормативних документів і чинного законодавства. Керівники підрозділів, безпосередньо відповідаючи за стан безпеки праці в господарстві, приділяють відповідну увагу стану безпеки праці. В господарстві є приміщення, в якому знаходиться обладнаний згідно вимог кабінет з безпеки праці. В ньому проводять інструктаж з робітниками і студентами. Цю роботу здійснює інженер з безпеки праці. Через кожні 6 місяців в господарстві проводяться інструктажі з безпеки праці на робочому місці, про що робиться відповідний запис у спеціальному журналі. Під час влаштування на роботу з особами проводять вступний інструктаж в кабінеті з безпеки праці відповідно до програми (ОСТ 46.0,126-82 ССТБ) із застосуванням всіх технічних засобів, які збереглись. На робочому місці проводиться первинний інструктаж з усіма без винятку особами, яких вперше беруть на роботу.

Відповідно до статті 17 Закону України “Про охорону праці на підприємстві” розробляються комплексні заходи для досягнення встановлених нормативів з безпеки праці. До них входять організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні, соціально-економічні, лікувально-профілактичні, заходи випробуванню прогресивних технологій, досягнень науки і техніки, засобів механізації та автоматизації виробництва, які сприяють вирішенню питань з безпеки праці

Комплексні заходи з безпеки праці розробляють на базі одержаних даних про стан безпеки праці на кожному робочому місці і використовують під час розробки перспективних поточних та оперативних планів відповідно до існуючої системи планувань.

Метою планування заходів з безпеки праці є вдосконалення виробничих процесів відповідно вимогам стандартів ССБТ та інших вимог з безпеки праці, а також

виробничого (енергосилового) обладнання, що відповідає вимогам підтриманню його в відповідному стані.

У господарстві здійснюється контроль за станом безпеки праці, який є основним заходом у виявленні потенційних виробничих небезпек на робочих місцях, порушень працівників чинних норм і правил, а посадовими особами – обов'язків з безпеки праці.

Інженер з безпеки праці збирає, підготовлює, переробляє та впроваджує інформацію про умови праці на робочому місці. Від керівника господарства у формі наказів та розпоряджень надходять до інженера з безпеки праці та головному інженерові, а далі до безпосереднього виконавця, бригадира тракторної бригади, керівника виробничої ділянки та інші робочі місця.

У результаті постійного контролю з безпеки праці на робочих місцях виявляються виробничі небезпеки, небезпечні умови та небезпечні дії. Ці небезпеки фіксуються на робочих місцях в журналах першого та другого ступня оперативного контролю. Інформація про небезпеку надходить до керівника ділянки та інженера з безпеки праці. Процес усунення небезпеки відбувається шляхом розробки спеціальних заходів керівниками ділянок інженера з безпеки праці.

Розробка та вжиття ефективних заходів запобігання аварійності і травмонебезпечним ситуаціям можливі лише при завчасному виявленні тих небезпек, з яких починаються процеси їх формування.

У приміщеннях для переробки сільськогосподарської продукції на одного працюючого допускається: об'єм повітря – 13 м^3 , площа – 4 м^2 , ширина проходів - до $0,7 \text{ м}$, а евакуаційних виходів при кількості працюючих до 50 людей - не менше $0,9 \text{ м}$.

Вимоги до обладнання підприємства. Механізми та обладнання, які здійснюють небезпечні рухи (обертання, коливання, та інше) і які можуть травмувати людину повинні бути надійно захищені швидкоз'ємними огорожами, щитами та інше. Кожна машина, яка працює від електродвигуна, повинна бути заземлена. Машини і обладнання не повинні створювати шум, що перевищує санітарно-гігієнічні вимоги з безпеки праці. Вузли машин та агрегатів, які створюють небезпеку, повинні бути покращеними у відповідний колір і захищені. Кнопкові пристрої та органи управління машинами повинні мати чіткі позначення. Конструкція засобів повинна виключати

можливість їх самовільного вмикання і вимикання. Все електрообладнання і електроспоживачі підключаються до електромережі тільки через автоматичні системи керування і автоматичного вимикання. Електрокомунікації повинні мати подвійні захисні огороження.

Пожежна безпека повинна задовольняти вимогам “Типових правил пожежної безпеки для об’єктів сільськогосподарських виробництв”. В підприємстві обов'язково повинні бути засоби пожежогасіння. Заходи, які необхідно розробити для забезпечення протипожежної безпеки:

- забезпечити дотримання роботи протипожежного режиму;
- розробити конкретну інструкцію для обслуговуючого персоналу з дотриманням правил протипожежної безпеки на виробництві;
- забезпечити повну комплектацію щитів протипожежної безпеки.

Огороджуючі пристрої повинні мати надійне кріплення до основного обладнання, легко відкриватись і надійно закриватись. При зніманні огорожень зусилля, що прикладається до нього, не повинно перевищувати 80 Н.

Огороження з металевих сіток (решіток) розміщують не ближче як за 50 мм від рухомих деталей.

Щоб попередити працюючих про можливі небезпеки, заборону певних дій або зобов'язати чи дозволити виконувати ті чи інші дії тощо, застосовують сигнальні кольори, сигналізацію, знаки та плакати безпеки.

Для попередження забивання матеріалопроводів встановлюють звукову сигналізацію з фотоелементами.

5.1. Розрахунок вентиляції і освітлення у приміщенні

Для виробничих цехів, підсобних приміщень і побутових служб обладнується вентиляція із врахуванням діючих норм і технічних умов СНиП 33-75. Природна вентиляція не залежить від механічної і цех забезпечується вентиляційними отворами і кватирками, обладнаними пристроями для їх відкривання і фіксації у потрібному положенні. Повітрообмін потрібен для зменшення запиленості, задимленості і для

очищення повітря від шкідливих викидів виробництва, а також для подовження строку служби обладнання. Передбачається місцева вентиляція (витяжка) від джерел виділення вологи, газів, тепла.

В тих приміщеннях, де можна розрахувати кількість шкідливих виділень величину повітрообміну розраховують за формулою:

$$L = 10^6 G / \rho, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (5.1)$$

де G – кількість шкідливих виділень, кг/год;

ρ - гранично допустима концентрація забруднення повітря, мг/м³.

Якщо ж відома кратність повітрообміну в приміщенні то розрахунки ведуть за формулою:

$$L = V k, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (5.2)$$

де V – об'єм приміщення, м³ (з попередніх розрахунків $V = 660 \text{ м}^3$)

k - годинна кратність обміну повітря: $k=3...4$.

$$L = 660 \cdot 4 = 2640 \text{ м}^3/\text{год},$$

Діаметр повітропроводу вентиляції розраховуємо за формулою:

$$d = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{L}{\pi V_v}}, \text{ м} \quad (5.3)$$

де V_v - швидкість повітря в повітропроводі, м/с ($V_v=15 \text{ м/с}$).

$$d = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{5832}{3,14 \cdot 15}} = 0,37 \text{ м}.$$

Приймаємо переріз витяжного каналу $0,4 \times 0,4 \text{ м}$.

Тиск вентилятора визначається за формулою:

$$H = H_{\text{дин}} + H_p + H_m, \text{ Па}, \quad (5.4)$$

де $H_{\text{дин}}$ – динамічний тиск, Па;

H_p – втрати тиску на подолання опору руху повітря у повітропроводі, Па;

H_m – втрати напору від місцевих опорів, Па.

$$H_{\text{дин}} = \rho_v V_v^2 / (2g), \quad (5.5)$$

де ρ_v – густина повітря, кг/м³ ($\rho_v = 1,24 \text{ кг/м}^3$);

$$H_{\text{дин}} = 1,24 \cdot 15^2 / (2 \cdot 9,81) = 14,22 \text{ Па}.$$

$$H_p = \lambda_v \rho_v V_v l / (0,9 \cdot 2g), \quad (5.6)$$

де l – довжина повітропроводу, м ($l = 18$ м);

λ_v – гідравлічний коефіцієнт опору руху повітря: $\lambda_v = 0,0155$ Па.

$$H_p = 0,0155 \cdot 15 \cdot 1,24 \cdot 18 / (0,9 \cdot 2 \cdot 9,81) = 0,29 \text{ Па.}$$

Визначаємо втрати напору від місцевих переходів за формулою:

$$H_m = \varepsilon \rho_v V_v / (2g), \quad (5.7)$$

де ε - коефіцієнт опору руху ($\varepsilon = 1,1$).

$$H_m = 1,1 \cdot 15 \cdot 1,24 / (2 \cdot 9,81) = 1,16 \text{ Па.}$$

Загальний тиск вентилятора:

$$H = 14,22 + 0,29 + 1,16 = 16 \text{ Па.}$$

Знаючи подачу вентилятора та напір вибираємо вентилятор УЦ-50. За аеродинамічними характеристиками визначаємо частоту обертання крильчатки, $n_v = 1500$ об/хв, коефіцієнт корисної дії вентилятора $\eta = 0,75$, потужність $N_v = 0,5$ кВт.

5.1.1. Розрахунок природного освітлення в цеху

У приміщеннях цеху потрібно максимально використовують природне освітлення. Забороняється заставляти вікна виробничим та іншим обладнанням. Не рідше одного разу на квартал проводиться очищення вікон від пилу. Штучне освітлення повинно може бути як загальним, так і суміщеним.

Освітлення передбачене природне через вікна і штучне - за допомогою ламп розжарювання. Природне освітлення здійснюється через вікна розміром 1500x1200 мм. Загальну площу вікон обчислюємо за формулою:

$$\sum S_v = S_n l_{min} n_o k / (100 i_o n_1), \quad (5.8)$$

де S_n – площа підлоги цеху, м²;

l_{min} – мінімальний коефіцієнт природного освітлення, ($l_{min} = 0,5$);

n_o – світлова характеристика вікон ($n_o = 11$);

k – коефіцієнт, що враховує затемнення вікон сусідніми будівлями, $k = 1$;

i_0 – коефіцієнт світлопропускання з врахуванням затінення, $i_0 = 0,35 \dots 0,60$;

n_1 – коефіцієнт, що враховує відбивання світла від внутрішніх поверхонь приміщення, $n_1 = 2$.

$$\sum S_b = 324 \cdot 0,5 \cdot 11 \cdot 1 / (100 \cdot 0,4 \cdot 2) = 22,3 \text{ м}^2$$

Розрахуємо загальну кількість вікон за формулою:

$$n = \sum S_b / S_6, \quad (5.9)$$

де S_b – площа одного вікна, м^2 .

$$n = 22,3 / 1,8 = 12,4$$

Приймаємо 12 вікон розміром 1500x1200 мм.

Розрахунок штучного освітлення в цеху. Необхідна кількість ламп для штучного освітлення визначається при перетворенні формули:

$$F = k S_n E_{\min} / (n Z \eta), \quad (5.10)$$

де F – світловий потік для лампи 150 Вт, ($F = 2510$ лм);

k – коефіцієнт запасу, $k = 1,3$;

S_n – площа підлоги приміщення цеху, $S_n = 324 \text{ м}^2$

E_{\min} – освітленість по нормі для підприємств, лк ($E_{\min} = 100$ лк);

Z – коефіцієнт нерівномірної освітленості, $Z = 0,98$;

η – коефіцієнт використання світлового потоку, $\eta = 0,57$;

n – кількість ламп.

Перетворивши дану формулу і здійснивши необхідні розрахунки визначимо необхідну кількість ламп загального освітлення для цеху:

$$n = 1,3 \cdot 324 \cdot 100 / (2510 \cdot 0,98 \cdot 0,57) = 30.$$

Приймаємо 30 ламп з потужністю 150 Вт.

Охорона навколишнього середовища. В житті людини навколишнє середовище і природа відіграють величезну роль. Тому необхідно старатися не забруднювати навколишнє середовище продуктами діяльності людини. Стічні води є основним джерелом забруднення навколишнього середовища. Вони утворюються в

результаті деяких технологічних процесів і очищення обладнання переробного підприємства. При недостатньому очищенні цих вод забруднюється навколишнє середовище. Для стоку стічних вод при плануванні площі території передбачаються нахили, направлені від будівель і інших споруд до водозбірників (із загальним нахилом території в бік господарського двору). Після відстоювання стічні води спускаються в каналізаційну мережу з дотриманням “Правил безпеки при експлуатації водопровідно-каналізаційних мереж”.

Виходячи з загальних методичних положень виробничих небезпек (рис. 5.1), на робочому місці брикетування рослинної біомаси у паливні вироби загрозу здоров'ю працівників становлять крім **виробничих травм** ще **запиленість, виробничий шум і вібрація** робочих механізмів твердопаливного устаткування.

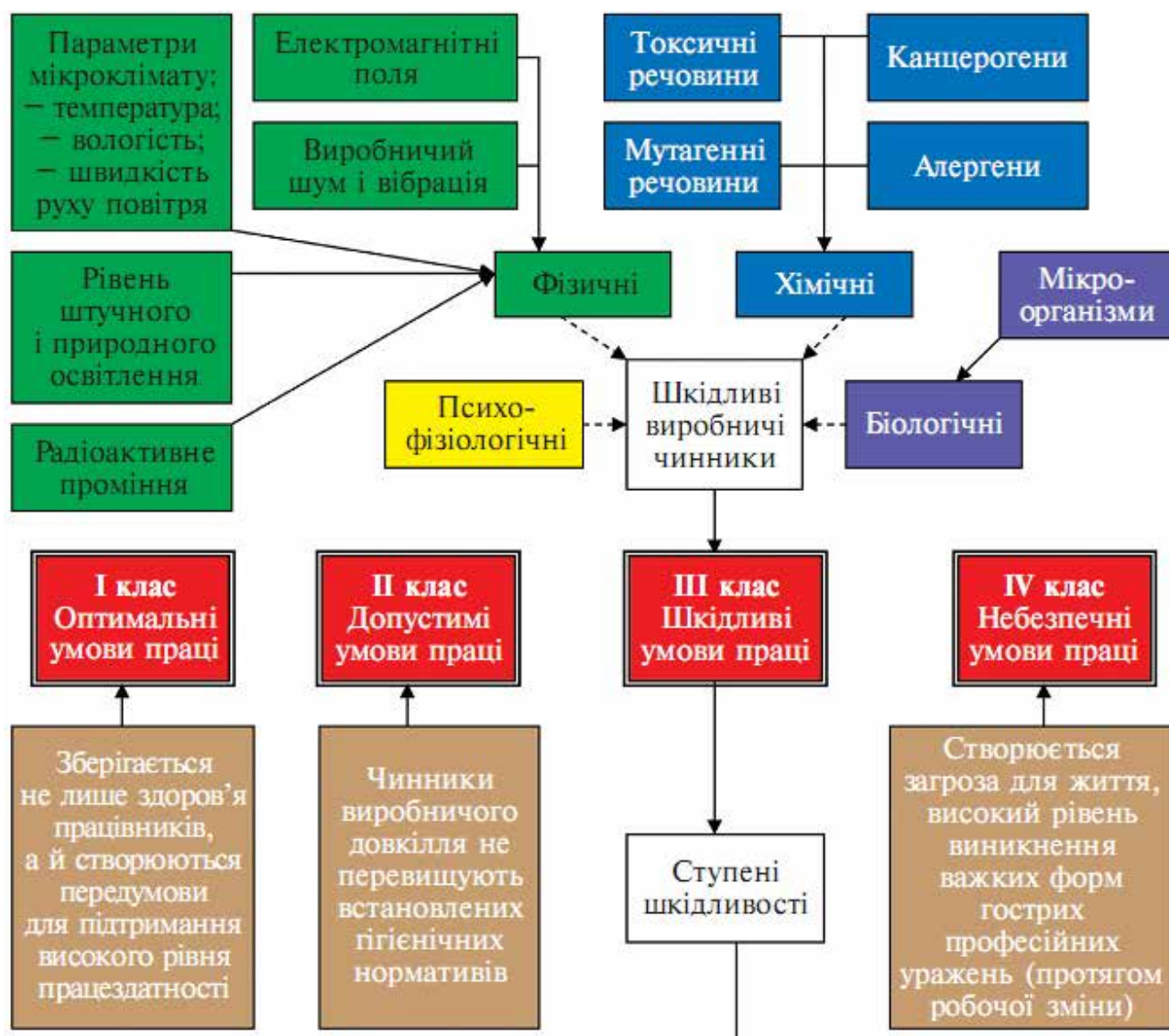


Рис. 5.1. Класифікація небезпечних і шкідливих факторів умов праці

Розробленню заходів зменшення впливу визначених небезпечних факторів та покращенню умов праці на виробництві присвячені наступні частини проекту з безпеки праці.

5.2. Заходи безпечної експлуатації твердопаливного обладнання

Лінія для виробництва паливних виробів складається з такого обладнання, як бункер-накопичувач, скребковий і стрічковий транспортер, циклон, сушарка барабанного типу, молоткова дробарка, гранулятор для отримання паливних виробів, охолоджувач виробів та фасувальний пристрій. У даному обладнанні відбуваються складні технологічні процеси, які мають цілий комплекс шкідливих та небезпечних факторів та ризиків, які негативно впливають на організм людини, навколишнє середовище та можуть призвести до надзвичайних ситуацій. Найбільш значимими ризиками є фізичні та хімічні небезпеки. Ці небезпеки, які характерні для певного технологічного обладнання, наведено у таблиці 5.1.

Проаналізувавши таблицю 5.1, можливо зробити висновок, що найбільш небезпечним є пристрій для виробництва паливних виробів, сушарка та молоткова дробарка. До найбільш значних факторів можливо віднести: підвищену запиленість та загазованість робочої зони, підвищену температуру поверхні обладнання та матеріалів та гострі кромки обладнання і інструменту.

Стан повітря робочої зони визначався відповідно до вимог ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.014 і за технічною документацією на методи визначення шкідливих речовин в повітрі, затвердженої наказом МОЗ України. Рівень шуму на робочих місцях вимірювали відповідно до вимог ГОСТ 12.1.050, джерел шуму – відповідно до вимог ГОСТ 12.1.028. Оцінку результатів вимірювання шуму проводили відповідно до вимог ГОСТ 12.1.003 і санітарним нормам допустимих рівнів шуму на робочих місцях.

Таблиця 5.1. Фізичні та хімічні фактори небезпек та ризиків, що характерні для обладнання лінії для виробництва паливних виробів з вторинної біомаси

Фактор небезпеки/ назва обладнання	Бункер накопичувач	Транспортер	Циклон	Сушарка	Дробарка	Пристрій гранул	Охолоджувач	Фасувальний пристрій
Гострі кромки обладнання, інструменту					+			+
Підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони	+	+			+	+	+	+
Гарячі або холодні місця повітря робочої зони	+		+	+		+	+	
Підвищена температура поверхні обладнання і матеріалів				+	+	+		+
Підвищений рівень шуму на робочому місці		+	+		+	+		+
Підвищений рівень вібрації на робочому місці		+	+	+	+	+		+
Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини		+	+	+	+	+		+
Підвищений рівень статичної електрики		+	+	+	+	+		+
Підвищений рівень електромагнітних випромінювань				+	+	+		+
Підвищений рівень інфрачервоного випромінювання				+				
Токсичні речовини				+		+	+	
Подразнюючі речовини				+		+	+	

Вимірювання та контроль вібрації проводили відповідно до вимог ГОСТ 12.1.012 та методичних вказівок з проведення вимірів і гігієнічної оцінки виробничих вібрацій, затвердженим Міністерством безпеки здоров'я України. Контроль електробезпеки проводили відповідно до вимог ГОСТ. Температуру зовнішньої поверхні обладнання та паливних виробів вимірювали контактною термопарою з вимірювальним приладом відповідно до вимог ГОСТ 9736.

Випадки механічного травмування під час роботи з торцювальним пристроєм, дробаркою та ін. обладнанням мають наступний характер (%):

- травмування пальців або кисті рук внаслідок захоплення робочих органів, які обертаються – 45;
- потрапляння до очей літаючого пилу – 40;
- травмування рук або ніг при налагодженні обладнання, установки та демонтажі оброблюваної деталі, кріпленні і зняття деталей – 9;
- травмування гранулами, які пройшли рикошетом при переміщенні – 4;
- травмування пальців рук при збиранні сировини – 2;
- інші випадки травмування – 2.

Одним з суттєвих шкідливих та небезпечних виробничих факторів є органічний пил. Основним джерелом утворення пилу служать екструзійні, фасувальні та подрібнювальні процеси. Під час цих процесів у повітря виділяється високодисперсний пил (0,8–5 мкм) до складу якого, крім органічних, входять і металеві та мінеральні частинки.

Вміст пилу у повітрі може досягати найбільшої величини при подрібненні та розпилюванні без використання вентиляційної системи (32–163 мг/м³).

При переробці органічних матеріалів відбуваються механічні та фізико-хімічні зміни їх структури, в повітря робочої зони надходить складна суміш парів, газів і аерозолів. Летючі продукти, що утворюються при тепловому розкладанні (термодеструкції) ряду органічних речовин, є пожежовибухонебезпечними, токсичними та можуть викликати зміни центральної нервової і судинної систем, кровотворних і внутрішніх органів, а також шкірно-трофічні порушення. Тривале вдихання пилу у виробничих умовах може призвести до розвитку пилових захворювань бронхо-легеневого апарату – пневмоконіозів- та, хронічного пилового бронхіту. Надзвичайно небезпечне вдихання пилу, газів, що призводить до захворювання бериліозом. Дані за вмістом пилу в повітрі робочої зони наведено у таблиці 5.2.

Спектри шуму більшості обладнання лінії для виробництва паливних виробів з рослинної біомаси мають середній та високочастотний характер. Загальні рівні звукового тиску знаходяться в межах від 80 до 100 дБА.

Таблиця 5.2. Вміст пилу в повітрі при виробництві залежно від типу сировини

Перероблювальна сировина	Вміст пилу, мг/м ³
Лушпиння соняшнику	800–1000
Тирса	500–554
Солома ячменю	126–238

Найбільш високі рівні були зареєстровані в робочій зоні біля дробарки, пристрійу та фасувального пристрою.

Рівень звукової потужності на робочому місці оператора не повинен перевищувати гранично-допустимий рівень 80 дБА, тобто необхідно виконувати заходи безпеки для зменшення дії цього фактору.

На робочих місцях під час роботи з транспортером, сушаркою, дробаркою, пристрійом, циклоном та приводними механізмами утворюється вібрація, рівень якої та вплив її на організм людини наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Рівень вібрації та її вплив на організм людини

Тип обладнання	Амплітуда коливань вібрації, мм	Частота вібрації, Гц	Результат впливу
Транспортер	0,016	30	Нервові збудження з депривацією
Циклон	0,040	45	
Сушарка	0,045	50	
Приводні механізми	0,047	50	
Дробарка	0,095	60	Зміни у центральній нервовій системі, серці та органах слуху
Пристрій	0,065	55	

Також трапляються опіки, якщо вологість сировини перевищує 8 %, це пов'язано з тим, що під час екструзії утворюються парові пробки, сировина вилітає з головки устаткування та травмує робітників. Технічне обслуговування устаткування та пакування виробів заборонено, якщо їх температура перевищує 40 °С. Під час екструзії під великим тиском та високою температурою відбувається

термічна деструкція, піроліз поверхні паливних виробів.

Хімічний склад повітря та вміст димових газів, які утворюються при піролізі біомаси майже не залежить від типу сировини. Під час піролізу 1 м³ сировини утворюється 85–95 м³ газів, з яких метан та кисень утворює вибухонебезпечну суміш. Повітря в робочій зоні має такий склад (%) та підвищену температуру (°C) – оксид сірки 10–16; кисень 8–15; оксид азоту 9–16; метан 0–0,01; діоксид вуглецю 5–9 та температура димових газів 70–255.

Під час виробництва паливних виробів, у зоні екструзії утворюється дим [43, 44], склад якого наведений у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4. Склад диму і пилю при виробництві паливних виробів

Назва речовини, яка визначається	Швидкість аспірації, л/хв.	Час відбору проб, хв.	Фактична концентрація, мг/м ³	Гранично допустима концентрація, мг/м ³	Методика дослідження
Акролеїн	0,5	20	0,5	0,2	МУ 2719-83
Діоксид азоту	0,2	5	3,5	2	МУ 1638-77
Діоксид вуглецю	0,2	5	19,0	20	ГОІЕ АПИ 2.840.087
Пил рослин. походження	20,0	30	10,0	6	МУ 4436-87
Діоксид кремнію	20,0	30	2,0	–	МУ 2391-81

З табл. 5.4 видно, що під час виробництва паливних виробів в зоні екструзії утворюються сполуки, рівень яких перевищує гранично-допустиму концентрацію та які негативно впливають як на організм людини, так і на навколишнє середовище.

Рівні небезпечних і шкідливих факторів у виробничих приміщеннях і на робочих місцях не повинні перевищувати гранично-допустимих значень, затверджених Міністерством охорони здоров'я України.

Розрахунок надлишкового тиску вибуху для горючого пилю проводився згідно вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 за формулою:

$$\Delta P = \frac{m H_T P_o z}{V_{віль} \rho_E c_p T_O k_H}, \quad (5.11)$$

де m – маса горючого пилу, кг;

H_T – теплота згоряння, Дж кг^{-1} ;

P_o – атмосферний тиск, кПа (приймаємо 101,3 кПа);

z – розуміється частка участі завислого горючого пилу у вибуху за відсутності експериментальних даних про величину z ; приймаємо $z = 0,5$;

$V_{\text{віль}}$ - вільний об'єм приміщення, м^3 ;

ρ_E - густина повітря до вибуху за початкової температури T_o , $\text{кг}/\text{м}^3$;

c_p – теплоємність повітря, Дж $\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ (приймаємо такою, що дорівнює $1,01 \cdot 10^3$ Дж $\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$);

T_o – початкова температура повітря, К.

Використання способу [47] отримання твердого палива з рослинної сировини та присадки дозволив перевести небезпеку виробництва з категорії Б (пожежовибухонебезпечне) в категорію В (пожежонебезпечне), знизивши надлишковий тиск горючого пилу з 6 кПа до 0,25 кПа, який був розрахований за формулою (5.11).

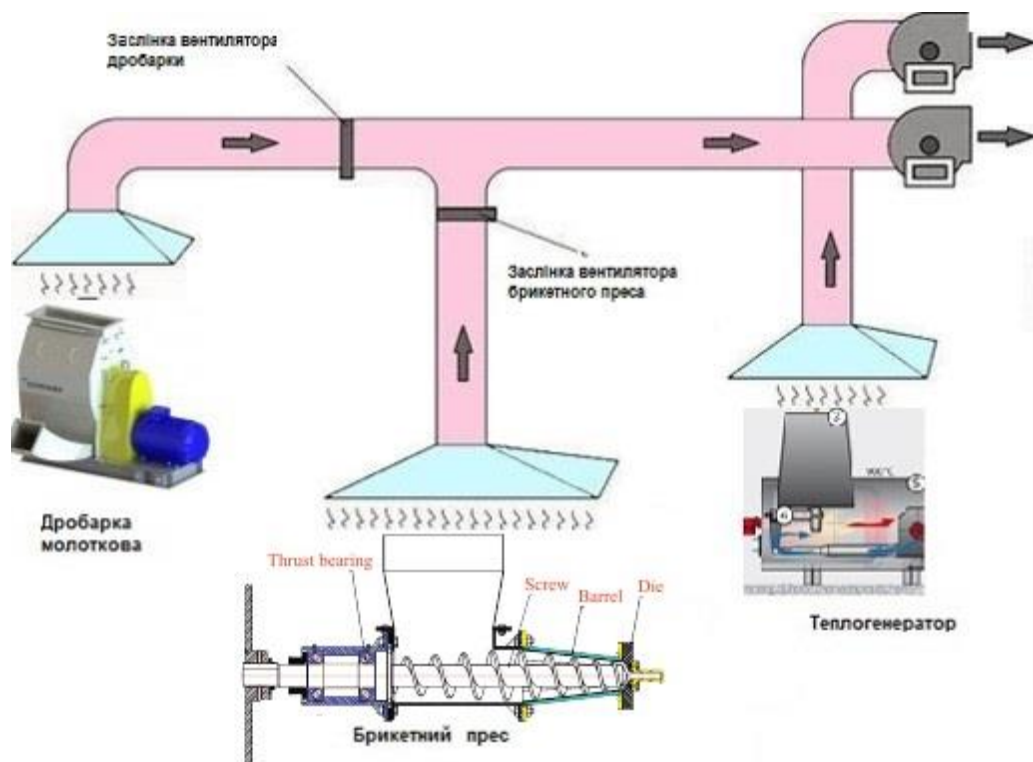


Рис. 5.2. Схема до зниження впливу шкідливих чинників на виробництві

Гарячій пристрій та інше обладнання, що виділяє тепло, повинно бути обладнане екранами, щоб інтенсивність теплового заручення на робочих місцях не перевищувало 100 Вт/м^2 відповідно до нормативних вимог.

5.3. Розробка умов безпечної праці на молоткових і роторних дробарках

При виробництві багатьох видів кормів та на твердопаливних підприємствах для забезпечення дрібного і тонкого подрібнення рослинних матеріалів до розмірів частинок менш 5 мм широкого розповсюдження набули подрібнювачі ударної дії, зокрема молоткові і роторні дробарки, дезінтегратори та ін. [41]. Разом з цим, експлуатація та обслуговування такого обладнання супроводжує виникнення ряду небезпечних чинників, а саме: механізми, що швидко обертаються, підвищений шум і вібрація, електрична та пожежна небезпека, пилоутворення тощо [42].

Мета роботи: навести заходи щодо безпечної роботи на молоткових і роторних дробарках в умовах АПК для запобігання нещасним випадкам під час експлуатації подрібнювачів ударної дії.

Викладення основного матеріалу. В молоткових і роторних дробарках руйнування рослинного матеріалу відбувається за рахунок ударних навантажень, які виникають при дії робочих органів, що обертаються, зіткненні летючих частинок між собою та з нерухомими поверхнями.

Молоткова дробарка складається з корпусу, який футерований стальними відбійними плитами, на валу ротора змонтовані диски з шарнірно навішеними молотками. Матеріал після ударних дій молотків руйнується, частинки певного розміру проходять крізь колосникову решітку та виводяться з дробарки [41].

Молотки, плити та решітка виготовляються зі зносостійкої сталі (вуглецевої з твердосплавними напайками або марганцевистої). Ступінь подрібнення в молоткових дробарках досягає 15-20 при кінцевому розмірі частинок 1-5 мм [41, 42].

В роторних дробарках руйнування матеріалу відбувається за рахунок бил, що швидко обертаються й жорстко закріплені на зовнішній поверхні ротора. В дробарці

з матеріалу спочатку відсіюється дрібна фракція, а основна маса направляється на ротор, де відбувається подрібнення [41].

Зазначені дробарки є високопродуктивні, забезпечують суттєву ступінь подрібнення. Проте швидке зношення робочих елементів, велике пилоутворення, необхідність точного балансування роторів є їхніми недоліками.

До обслуговування дробарок допускаються особи, які досягли 18 років та пройшли медичний огляд для визначення їх придатності до виконання обов'язків дробильника, мають необхідний рівень технічних знань і практичних навичок в роботі. Навчання за професією проходять в навчальних пунктах. Під час навчання дробильник допускається до роботи спільно з досвідченим оператором.

До роботи з подрібнення грубих кормів допускаються працівники, які пройшли навчання з питань безпеки праці та отримали відповідне посвідчення. Перед початком виробничої діяльності дробильник повинен отримати на робочому місці первинний інструктаж з безпеки праці. Повторний інструктаж проводять не рідше одного разу на квартал. Якщо з організації праці дробильник зобов'язаний обслуговувати інші механізми та агрегати (живильники, грохоти, конвеєри тощо), то він повинен бути навчений всім видам робіт.

Працівники, які зайняті на подрібненні кормів чи біосировини, повинні бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям, захисними окулярами, рукавичками та іншими засобами індивідуального захисту.

До початку роботи дробильник повинен упевнитися в безпечному стані робочого місця, перевірити наявність і справність запобіжних пристроїв, інструменту, механізмів і пристосувань, потрібних для роботи.

Усі рухомі частини дробарки та пасові передачі повинні мати огороження, що виключають доступ до них під час роботи. Огороження необхідно надійно закріплювати. Оберткові частини (вали, муфти, шківни) повинні мати суцільні або сітчасті огорожі з осередками не більше 25 мм. Сітчасте огороження роторів допускається з розміром вічка не більше 40 на 40 мм.

Усі монтажні прорізи-приямки, закривають настилами урівень, або захищають поручнями висотою не менше 1 м із суцільною обшивкою по низу поручнів на висоту 0,14 м.

На робочому місці вивішують інструкцію про порядок пуску, експлуатації та зупинки дробарки. Перед пуском має бути поданий попереджувальний сигнал. Якщо пуск здійснюють з пульта управління, а дробарка знаходиться поза зоною видимості, то подають звуковий сигнал тривалістю не менше 10 с, після якого робиться витримка у часі не менше 30 с, а потім після подачі другого сигналу тривалістю 30 с запускають дробарку.

В роботі дробарок з підвищеним рівнем шуму повинна бути передбачена дублююча світлова сигналізація.

Забороняється ремонт рухомих частин і огорожень при роботі дробарки, а також змащення механізмів на ходу, якщо маслянки не виведені в безпечну зону від рухомих частин. Очищувати робочі зони дробарки дозволяється тільки при вимкненому електромеханічному приводі.

Шурування у випускних отворах живильників, завантажувальних і розвантажувальних воронках при працюючих живильниках допускається тільки при наявності спеціальних шуруваних отворів і відповідному обладнанні робочого майданчика.

Під час роботи не допускається залишати обладнання без нагляду; працювати з обладнанням, у якого несправні захисні пристрої; піднімати, переносити або переміщувати обладнання без застосування спеціальних пристосувань.

У випадку аварійної зупинки дробарки подальший запуск здійснюють у відповідності до спеціально розробленої інструкції, що затверджена головним інженером підприємства.

Поблизу робочого місця повинні бути встановлені засоби пожежогасіння.

Після закінчення роботи необхідно відключити обладнання від електроживлення та прибрати робоче місце.

При ремонті дробарки електрична схема привода має бути знеструмлена, а на пускових пристроях вивішені плакати «Не вмикати - працюють люди!».

Про нещасний випадок потерпілий або свідок повинні негайно повідомляти особі технічного нагляду або керівнику виробничого підрозділу.

Оператор дробарки зобов'язаний вести записи в книзі здачі та прийому змін. Правильність заповнення книги перевіряє відповідальна посадова особа.

Висновок. Приведені заходи свідчать про значну кількість небезпечних чинників, що загрожуватиме здоров'ю та життю операторів молоткових і роторних дробарок. Запорукою виробничої безпеки на дробильних дільницях є ретельне виконання відповідних нормативних вимог.

Таким чином, аналіз факторів небезпек та оцінка ризиків вибухонебезпечного виробництва твердого біопалива з рослинної біомаси необхідні для модернізації заходів зі зменшення дії небезпечних факторів на організм людини та навколишнє середовище, які можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що процес виробництва твердих палив, який передбачає ущільнення і екстрагування технологічного матеріалу крізь канали матриці, є найбільш раціональним, оскільки реалізується в безперервному режимі й дозволяє отримати вироби з найбільшою щільністю, правильної форми, а також забезпечує ефективність подальшого використання гранул як біопалива.

2. **Перевага** молоткових дробарок полягає в їхній універсальності – з їхньою допомогою можна подрібнювати практично усі види сировини, що надходить на переробку. Молоткові дробарки мають відносно невеликі габарити, високу продуктивність. **Недолік** молоткової дробарки складається в нерівномірній дисперсності подрібненого продукту. Поряд з недостатньо подрібненими частками з'являються і переподрібнені, тобто дуже тонкі. Одержання тонких частинок супроводжується значною витратою електроенергії. У той же час, прагнення позбутися від таких часток веде до появи великої кількості не подрібнених частинок, особливо зерна. Тому часто застосовують двоетапне подрібнення, що полягає в повторному здрібнюванні не подрібнених часток, що виділяють при просіванні продуктів первинного подрібнення. Велика фракція може бути повернута в цю же дробарку або подрібнена в окремій дробарці. Для повторного подрібнення іноді застосовують вальцові верстати і молоткові дробарки.

До **недоліків** можна віднести швидке зношення молотків, відбійних плит, колосникових решіток, залипання колосникових решіток при подрібненні вологих пластичних матеріалів, складність монтажу і балансування ротора.

Ступінь подрібнення продукту залежить від розмірів отворів сита. Чим більші отвори, тим крупніше подрібнюється продукт.

3. Ротор молоткової дробарки має велику масу і високу швидкість обертання і тому необхідне його статичне і динамічне балансування. При заміні молотки ретельно підбирають та зважують. Різниця маси молотків у зборі з віссю і гайками для кріплення молотків, не повинна перевищувати 5 г. Ротор дробарки повинен провертатися від руки вільно.

Дроблення матеріалу відбувається при ударах шматків матеріалу, що відкидаються молотками, об рифлені відбійні плити, якими футерований кожух. Ступінь подрібнення регулюється розміром отворів колосників. Для виготовлення молотків, відбійних плит і колосників застосовуються зносостійкі марганцевмісні або

високо вуглецеві сталі, наплавлені твердим сплавом – сталінітом. В дробарках, призначених для подрібнення м'яких і в'язких матеріалів, молотки часто закріплюють нерухомо, що сприяє стиранню і розколюванню матеріалу. Такі дробарки називаються хрестовими.

4. Решітку займають від 80° до 180° нижньої частини кола ротора. Конструкція решіток повинна дозволяти змінювати їх положення відносно ротора, для налаштування дробарки на задану величину подрібнюваного продукту, а також для компенсації зношення молотків і колосників. У зв'язку з цим решітки роблять поворотними і підймальними, але в деяких конструкціях дробарок вони виконуються нерухомими, що є істотним недоліком таких дробарок.

5. Дроблення ударом в молоткових дробарках забезпечує більший ефект подрібнення, ніж дроблення роздавлюванням в інших типах дробарок, наприклад в щічних або конусних. Ступінь подрібнення в них у багато разів вища (доходить до 20-30), а питома витрата енергії на дроблення нижча, ніж в дробарках, що працюють за рахунок інших способів дроблення. Вони відрізняються простотою конструкції, компактністю та високою продуктивністю. Молоткові дробарки більш економічні, вартість їх на одиницю продуктивності в 1,5-2 і в 3,5-5,5 рази нижча, ніж в валкових і щічних дробарок відповідно, а маса в 4,5-5 разів менша. У молоткових дробарках набагато нижча встановлена потужність електродвигуна. Вони придатні для крупного, середнього і дрібного дроблення самих різних матеріалів.

Особливо різко знижується ефективність роботи дробарки при подрібненні соломи з підвищеною вологістю. Щоб уникнути цього сировину з підвищеною вологістю варто підсушувати до 15,0–15,5% вологості або ж розмелювати в суміші із сухою сировиною.

6. За результатами економічних розрахунків отримані показники (чистий річний прибуток – 207 тис. грн., рівень рентабельності – 10%, термін окупності капіталовкладень проекту – 2,2 років) свідчать про доцільність впровадження ефективного універсальної дробарки в технологічній лінії господарства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гелету́ха Г.Г., Петро́ва Ж.О., Корі́нчук Д.М., Желе́зна Т.А. та ін. Технології та обладнання для виробництва і споживання альтернативних видів палива. К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2020. 375 с.
2. Новітні технології біоенергоконверсії: монографія [Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелету́ха, І.П. Григорюк та ін.]. К.: Аграр Медіа Груп, 2010. 360 с.
3. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Промислова теплотехніка. 2017, т. 39, № 2. С. 60-64.
4. 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.
5. Yeremenko, O.I. Research of advanced crusher wood biomass for solid fuel production. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. 2020. Vol. 11, No 1, 105-113. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.105-113..>
6. Єременко О.І. Аналіз енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Науковий вісник НУБіП України. Серія: техніка та енергетика АПК. К.: 2013. Вип. 185, ч. 3. С. 347-355.
7. Альтернативна енергетика: навч. посібник для студ. вищ. навч. закл. / [М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко та ін.] К.: Аграр Медіа Груп, 2011. 612 с.
8. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements EN 14961 – 1: 2010 European standard.
9. ДСТУ-П CEN/TS 15210-1:2009: Біопаливо тверде. Методи визначення механічної міцності паливних гранул та виробів. Частина 1. Гранули (CEN/TS:15210-1:2005; IDT). [Дійсний від 2009-06-22]. К.: Держспоживстандарт України, 2009. 6 с. (Національний стандарт України).
10. Рожківський М.Ф. До визначення механізму деформації і руйнування рослинних матеріалів // Вісник аграрної науки. 2000. № 7. С. 50-53.
11. Рожківський М.Ф. Теоретичні передумови до визначення механізму руйнування рослинних матеріалів у дробарках ударної дії. Техніка АПК. 2000. № 7. С. 4-7.

12. Єременко О.І., Паянок О.В., Усенко Д.М. Аналіз стану та тенденції розвитку твердопаливних виробництв. Науковий збірник «Вісник Степу», ч. 2. Кіровоград: КОД, 2012. С. 234-240.

13. Перспективи ведучих компаній з розробок технологій та обладнання для виробництва твердого біопалива [електронний ресурс]. Режими доступу до журн.: www.bioresurs.com.ua; www.biotoplivo.ub.ua; www.pelletsgold.com/; www.ick.ua; www.alterenergy.info; www.biofuel.in.ua; www.bioresurs.com.ua; www.ivtech.de

14. Машина та обладнання переробних виробництв: навч. посібник / О.В. Дацишин, А.І. Ткачук, Д.С. Чубов та ін. / за ред. О.В. Дацишина. – К.: Вища освіта, 2005. – 159 с.

15. ДСТУ-П CEN/TS 15210-2:2009: Біопаливо тверде. Методи визначення механічної міцності паливних гранул та виробів. Частина 2. Вироби (CEN/TS:15210-2:2005; IDT). [Дійсний від 2009-06-22]. К.: Держспоживстандарт України, 2009. 6 с. (Національний стандарт України).

16. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В. Аналіз можливостей виробництва та використання виробів з агробіомаси в Україні. Аналітична записка БАУ № 20, 2018. 48 с. Режим доступу: www.uabio.org/activity/uabio-analytics

17. Єременко О.І., Паянок О.В. Перспективи розвитку засобів для виготовлення паливних виробів. Збірник наукових праць Вінницького НАУ. Серія: технічні науки. Вінниця: ВНАУ, 2012. Вип. 11, т. 1 (65). С. 327–331.

18. Єременко О.І. Підвищення функціональної ефективності брикетного преса ударно-механічної дії / О.І. Єременко, Р.А. Будь, А.О. Фрунт // Науковий збірник «Вісник Степу». Вип. 11, ч. 2. Кіровоград: КОД, 2014. С. 245-250..

19. Дацишин О.В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: [навч. посібник] / О.В. Дацишин, А.І. Ткачук, О.В. Гвоздєв та ін. / За ред. О.В. Дацишина. Вінниця: Нова Книга, 2008. 488 с.

20. 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.

21. Богомолів О.В. Курсове та дипломне проектування переробних і харчових підприємств: навч. посібник / О.В. Богомолів, П.В. Гурський, В.П. Богомолів. – Харків: Еспада, 2005. – 432 с.
22. Єременко О.І., Халецький О.В., Чорний Р.М. Методичні основи розрахунку параметрів пристрою вузла гранулятора. Науковий збірник Вісник Степу. Вип.9, ч. 2. Кіровоград: КОД, 2013. С. 251-256.
23. Бать Р.Я. Утилізація промислових відходів переробки біомаси шляхом створення біопалива: автореф. дис... на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.01 Екологічна безпека. Львів, 2008. 20 с.
24. Ревенко, І. І., Брагінець, М. В., Заболотько, О. О. та ін. (2011). Машини та обладнання для тваринництва: посібник-практикум. Київ: Кондор. 396 с.
25. Дубровін В.О., Єременко О.І. Напрями розвитку вітчизняної техніки для твердопаливних виробництв. Міжвідомчий тематичний науковий збірник Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха: ННЦ ІМЕСГ, 2013. Вип. 97, т. 2. С. 13-24.
26. Хайліс, Г. А., Федорусь, Ю. В. (2004). Механіка рослинних матеріалів: навчальний посібник. Луцьк: Луцький ДТУ. 301 с.
27. Практикум з машин та обладнання біоенергетики: [В.О. Дубровін, В.М. Поліщук, С.Є. Тарасенко, С.В. Драгнєв]. К: Аграр Медіа Груп, 2013. 208 с.
28. 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>
29. 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.
30. Єременко О.І., Поліщук В.М., Руденко Д.Т. Напрями раціонального проектування виробництва біопаливних виробів у господарстві. Збірник наукових праць, вип. № 14. Ніжин: НАІ, 2020. С. 304-309.
31. 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, pp. 624-628.

32. Сарана В.В., Кухарець С.М., Гудзенко М.М. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і виробів з відходів переробки сільськогосподарських культур і біомаси. Науковий вісник НУБіП України. Серія техніка та енергетика АПК. 2010. Вип. 14. Ч. 3. С. 190-197.

33. Лук'янець В.О., Субота С.В. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних виробів. Міжвідомчий темат. наук. збірник. Механізація та електрифікація с.-г. Вип. 99. Т. 2. Глеваха: 2014. С. 103-113.

34. Єременко О.І., Лук'янець В.О. Дослідження та вдосконалення живильного пристрою перспективного твердопаливного устаткування. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету [електронне фахове видання]. Мелітополь: 2014. Вип. 4, Т. 2. С. 146-156. Режим доступу: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/e-index.html>

35. Єременко О.І., Субота С.В. Аналітичне моделювання процесу брикетування біомаси в закритому каналі. Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха: ННЦ ІМЕСТ, 2021. Вип. 13 (112). С. 126-134.

36. EN 14961-1:2010 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements: European standard.

37. Семірненко С. Л. Дослідження залежності щільності виробів із соломи озимої пшениці від деяких факторів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків : 2011. Вип. 111. С.–112–120.

38. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М., Госовський Р. Р. Дослідження процесу формування паливних виробів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів : 2013. Вип. 23.17. С. 138–146.

39. Єременко О. І., Зубок Т. О., Лук'янець В. О. Результати досліджень процесу брикетування соломистих матеріалів ударним пристроєм. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ, 2019. Вип. 19. Т. 3. С. 98–104.

40. 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/>

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

42. Працезохоронні засади у схемах, таблицях і графіках. О.В. Войналович. К.: Основа, 2014. 142 с.

43. Войналович О.В. Безпека виробничих процесів: навч. посібник / О.В. Войналович, Т.О. Білько. К.: НУБіП України, 2009. 100 с.

44. Войналович О.В. Аналіз потенційних небезпек на пелетних виробництвах та заходи профілактики / О.В. Войналович, О.І. Єременко, Д.Г. Кофто / *Механізація та електрифікація с.-г.* Вип. 97. Т.2. Глеваха: ННЦ ІМЕСГ, 2013. С. 51-58.

45. Керб Л. П. Основи безпеки праці: навч. посібник. К.: КНЕУ, 2003. 215 с.

46. 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>

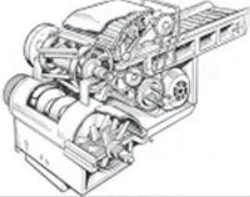
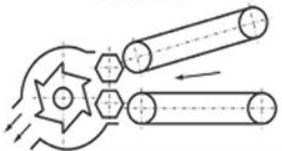
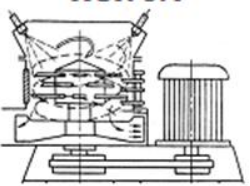
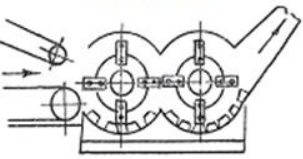
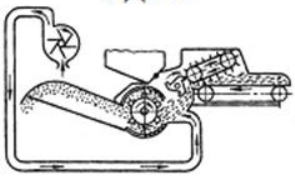
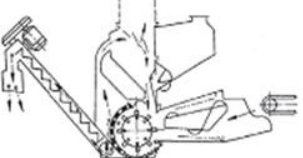
47. Braginets N., Vertiy A. 2015. Experimental researches of shredding machine of coarse and stalky fodder. *MOTROL. Motorization and power industry*. Vol.17. No.7. Lublin. 105-109.

48. 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>

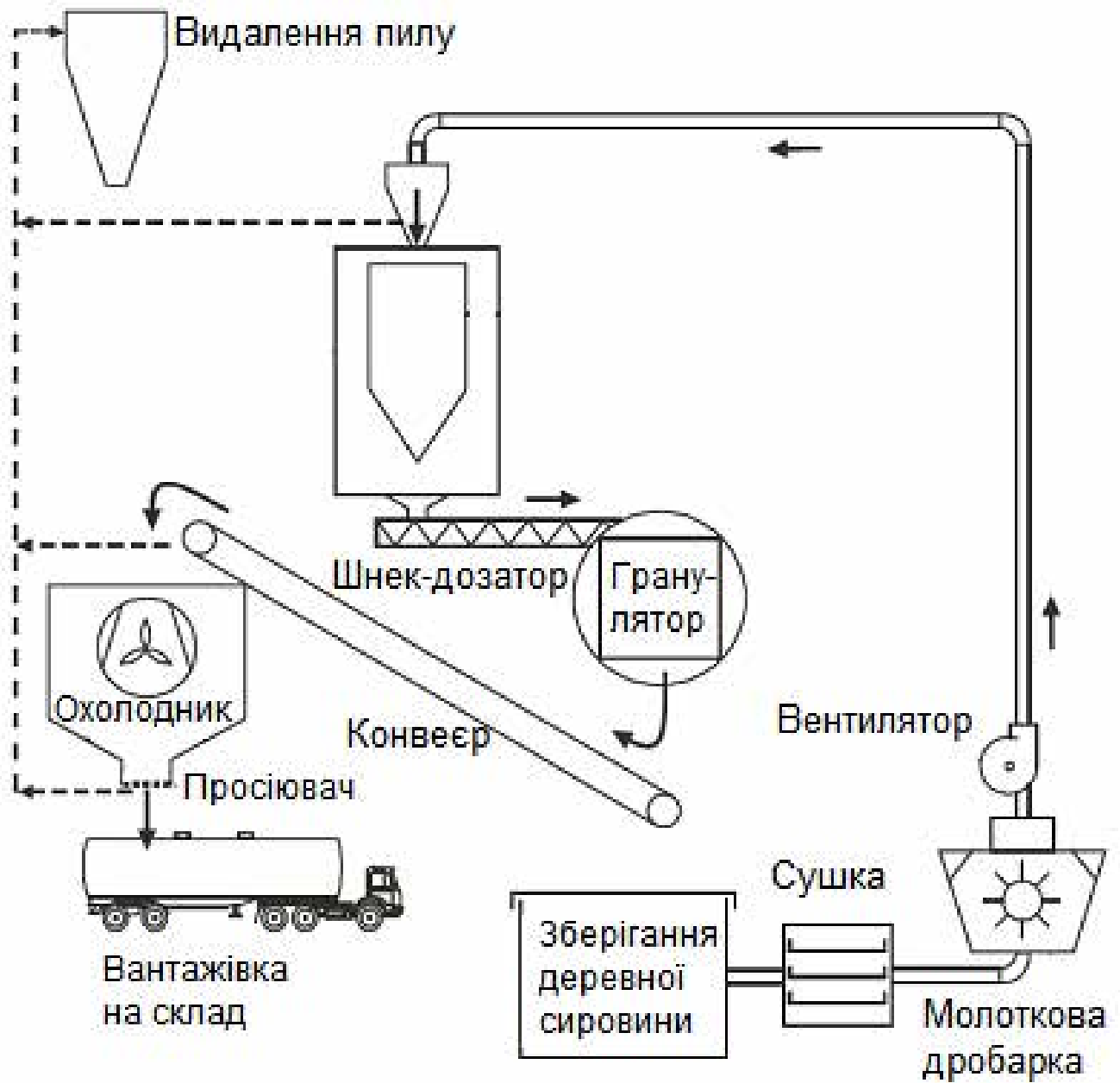
49. Єременко О.І., Войналович О.В., Данько М.А. Напрямки проектування твердопаливних виробництв у господарствах. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 р.). Національний університет природокористування України. Київ. 2025. 527 с.

50. Агафонова Л.Г., Рога О.В. Підготовка бізнес-плану: практикум. Київ: Знання, 2001. 278 с.

Додаток А – Класифікація подрібнювачів рослинних матеріалів

Марка подрібнювача	Кількість ступенів подрібнення	Спосіб подачі матеріалу на перший ступінь	Спосіб подрібнення на першому ступені / поверхня сліду леза (ножа)	Спосіб подачі матеріалу на другий ступінь	Спосіб подрібнення на другому ступені / поверхня сліду леза	Схема подрібнення
1	2	3	4	5	6	7
„Волгарь-5А”, ПК-5 „Случ”, ПК-2 	два	живильний та ущільнювальний транспортери	різання спіральними ножами та протирізом / циліндрична	шнековий транспортер-ущільнювач	різання рухомими і нерухомими ножами / плоска	різноплосцина
ИЗМ-5 	один	живильний та ущільнювальний конвеєри та рифлені вальці	різання спіральними ножами та протирізом / циліндрична	–	–	одноплосцина
ИСК-3А 	один	гравітаційний	різання горизонтальними ножами і протирізами / плоска	–	–	одноплосцина
ИРМА-15 	два	живильний та ущільнювальний транспортери	Перерізування та перетирання лезовими молотками та протирізами / плоска	енергія молоткового барабану	перерізування та перетирання молотками та протирізами / плоска	одноплосцина
КДУ-2 	два	живильний та ущільнювальний транспортери	різання спіральними ножами та протирізом / циліндрична	енергія різального барабану	перерізування та перетирання молотками та протирізами / плоска	різноплосцина
ДКМ-5 	один	живильний транспортер та ущільнювальний шнек	перерізування та перетирання молотками та протирізами / плоска	–	–	одноплосцина

Додаток Б - Схема типової технологічної лінії виготовлення паливних гранул з подрібненням деревної сировини (тріска, стружка) молотковою дробаркою



Додаток В – Технічний опис дробарки ІЗК-Ф-1 (базовий варіант)

Подрібнювач ІЗК-Ф-1 призначений для переробки зерна і коренеплодів в приватному господарстві та на малих тваринницьких фермах.

Складальними вузлами дробарки є рама, механізм привода та камера подрібнення 8. Змінними вузлами є молотковий ротор, бункер 14. Частоту обертання ротора (50 с^{-1} при подрібненні зерна) встановлюють клинопасовою передачею 5. Камера подрібнення 8 має диск 7, що приєднаний до рами, та циліндричну бокову поверхню 9, в якій при подрібненні зерна встановлюється трисекційне кругове решето 12 з діаметром отворів у секціях 4; 5; 6 мм. В нижній частині камери подрібнення знаходиться вивантажувальна горловина 10.

Ротор має диск 7, закріплений на маточині, і переднє кільце 17, які з'єднані між собою пальцями. На пальцях шарнірно підвішені молотки 18 і розпірні втулки. Під дією молотків і решета матеріал подрібнюється і просівається через отвори в зоні вивантажувальної горловини 19.

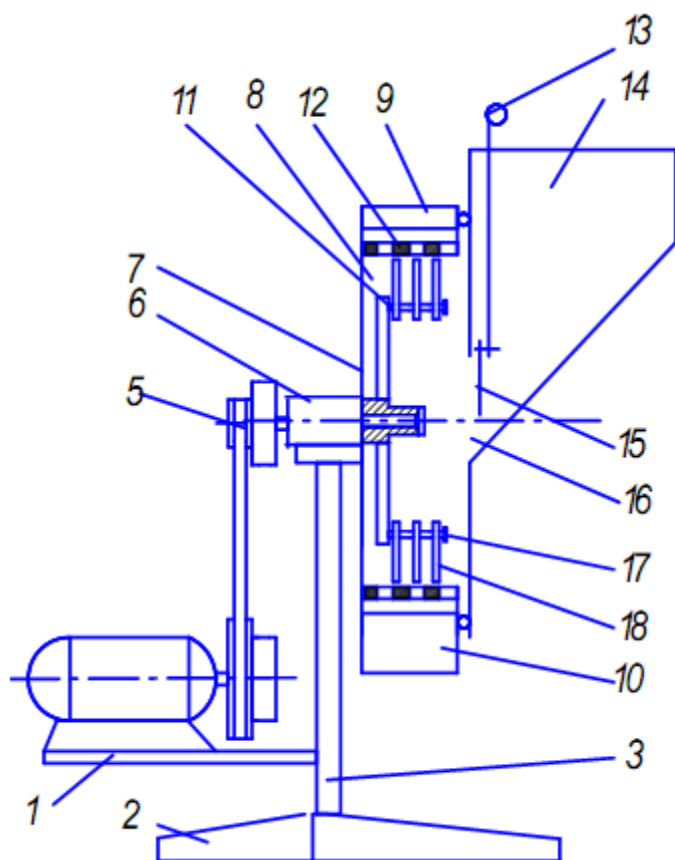


Рис. Конструктивно-функціональна схема подрібнювача зерна і коренеплодів:

1 - плита; 2 - опора; 3 - стояк рами; 4 - електродвигун; 5 - клинопасова передача; 6 - підшипниковий вузол; 7 - диск; 8 - камера подрібнення; 9 - бокова поверхня камери; 10 - вивантажувальна горловина; 11 - палець; 12 - решето; 13 - тяга заслінки; 14 - приймальний бункер; 15 - заслінка; 16 - завантажувальне вікно; 17 - переднє кільце ротора; 18 - молоток