Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка побутового гранулятора

Галузь знань — 14 Електрична інженерія

Спеціальність — 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма — Електропобутова техніка

Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
2 курсу група ЕТм-24-1 _____ Базалівський О.А.
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник _____ к.т.н., доц. Романець Т.П.
Підпис, дата Ініціали, прізвище

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Тимощук О.І.
Підпис, дата Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС _____ к.т.н., доц. Неймак В.С.
Підпис, дата Ініціали, прізвище

10 12 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень магістр

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Шифр і назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАЕЕС
к.т.н., доц. Неймак В.С.
10. 12 .2025р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Базалівський Олександр Анатолійович
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка побутового гранулятора

керівник роботи Романець Тарас Петрович, к.т.н., доцент
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025р

3. Вихідні дані до роботи звіт з переддипломної практики, технічні характеристики грануляторів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1. Аналіз існуючих підходів до отримання і використання паливних гранул. 2. Розробка технологічного процесу гранулювання. 3. Розробка конструкції побутового гранулятора. 4. Взаємодія робочих органів пристрою з сировиною в процесі гранулювання. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
1. Преси дляграгранулювання (ДО, А1). 2. Кінематична схема гранулятора (К3, А2). 3. Електрична схема гранулятора (Е3, А2). 4 Загальний вигляд побутового гранулятора (ГК, А1). 5. Головка гранулятора (СК, А1). 6. Деталювання основних робочих органів та вузлів гранулятора (А1). 7. Графічні залежності вихідних параметрів гранулятора (ДІ, А2)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз існуючих підходів до	до 15.10.25р.	
отримання і використання паливних		
гранул		
2. Розробка технологічного процесу	до 30.10.25р.	
гранулювання		
3. Розробка конструкції побутового	до 15.11.25р.	
гранулятора		
4. Взаємодія робочих органів	до 25.11.25р.	
пристрою з сировиною в процесі		
гранулювання		
5. Оформлення пояснювальної	до 10.12.25р.	
записки та графічного матеріалу		

Студент _____ О.А. Базалівський
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ Т.П. Романець
Підпис Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

1. Прізвище, ім'я та по батькові Базалівський Олександр Анатолійович

2. Тема магістерської роботи Розробка побутового гранулятора

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____
4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 63

5. Перспективи використання паливних гранул в Україні та світі виглядають доволі позитивними, особливо з огляду на енергетичну безпеку, екологічні вимоги та зростання цін на традиційні енергоносії. Паливні гранули виготовляються з місцевої сировини (тирса, агровідходи, солома, лушпиння соняшнику). Для України це зменшення залежності від імпортного газу та нафти, що є стратегічно важливим. Паливні гранули належать до відновлюваних джерел енергії. Викиди CO_2 вважаються майже нейтральними (вуглець повертається в природний цикл). Менше шкідливих викидів порівняно з вугіллям і мазутом. Метою роботи є розробка гранулятора для переробки відходів деревини та їх використання у побуті. в роботі описано характеристики сировини для виробництва паливних гранул. Запропоновано відповідний технологічний процес. Детально опи-сано його етапи. Розроблено конструкцію побутового гранулятора призначеного для виробництва паливних гранул із відходів деревини. Основними елементами запропонованого пристрою є плоска матриця, в якій безпосередньо відбувається гранулювання та притискні ролики, які забезпечують створення необхідного тиску на сировину. Розроблено електричну схему приводу гранулятора. Встановлено що щільність гранул є функцією тиску пресування дрібнодисперсної сировини через фільєру матриці. На величину тиску пресування впливають такі конструктивні характеристики, як радіус пресувального ролика, зазор між циліндричною поверхнею пресувального ролика та матрицею, діаметр циліндричного каналу фільєри та його довжина, розмір конічного каналу матриці та кут при вершині конуса.

Підпис студента _____
"10" 12 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 4 від "26" 12 2025 р.

Оцінка проекту ЕК відм/д 18/86
Рекомендації ЕК –

Особливі відмітки –
Технічний секретар Бердяк А.В.

"26" 12 2025 р.

Зміст

		с.
	Вступ	5
1	Аналіз існуючих підходів до отримання і використання паливних гранул	7
1.1	Загальні відомості про паливні гранули	7
1.2	Загальні відомості про гранулювання	11
1.3	Аналіз обладнання для гранулювання	13
2	Розробка технологічного процесу	17
2.1	Характеристика сировини для виробництва паливних гранул ..	17
2.2	Опис технологічного процесу виробництва паливних гранул	21
3	Розробка побутового гранулятора	26
3.1	Вибір типу гранулятора	27
3.2	Компоновка конструкції гранулятора	28
3.2	Електрична схема приводу гранулятора	31
4	Взаємодія робочих органів пристрою з сировиною в процесі гранулювання	35
4.1	Визначення тиску при вирізуванні сировини із стисненого шару	36
4.2	Визначення тиску в конічному каналі	37
4.3	Визначення тиску в циліндричному каналі матриці	47
4.4	Визначення повного тиску пресування	59
	Загальні висновки	61
	Перелік джерел посилання	62
	Додаток А	64

ВСТУП

Перспективи використання паливних пелет в Україні та в усьому світі досить позитивні, особливо враховуючи енергетичну безпеку, екологічні вимоги та зростання цін на традиційні джерела енергії [1]. Паливні пелети виготовляються з використанням місцевої сировини (тирса, сільськогосподарські відходи, солома, лушпиння соняшнику). Для України це зменшує залежність від імпортного газу та нафти, що має стратегічне значення.

Паливні пелети є відновлюваним джерелом енергії. Викиди CO_2 вважаються практично вуглецево-нейтральними (вуглець повертається в природний цикл). Вони виробляють менше шкідливих викидів порівняно з вугіллям та мазутом [3, 4].

У багатьох регіонах опалення паливними пелетами є економічнішим, ніж газом та електроенергією. Ці котельні легко масштабуються. Вони підходять для громад, які впроваджують незалежну систему опалення, що особливо актуально для громад, що проходять реконструкцію.

Україна вже є одним з провідних виробників біопалива в ЄС. Європейський зелений курс стимулює попит на паливні пелети. Ми маємо високий потенціал біомаси (сільськогосподарський сектор, деревообробка).

Тому паливні пелети є реальною, економічно вигідною та стратегічно важливою альтернативою традиційним видам палива. Їх використання має значний потенціал розвитку в Україні протягом наступних 10-20 років, особливо на місцевому рівні.

Технологічний процес виробництва паливних пелет базується, перш за все, на переробці низькоякісних деревних відходів, таких як тріска, пеньки, обрізки, тирса та стружка, для перетворення їх на паливні пелети, які ефективно замінюють традиційні джерела енергії, такі як вугілля, дизельне паливо, мазут тощо. Паливні пелети мають низку переваг порівняно з іншими видами палива. Вони мають високу насипну щільність порівняно з тирсою та паливною тріс-

кою, а також високу питому теплоту згоряння.

Виробництво паливних пелет не потребує використання додаткових ресурсів, таких як зв'язуючі речовини або вода. Однак виробництво паливних пелет з листяних порід деревини вимагає незначного пом'якшення пресованої сировини [2].

Раціональне споживання матеріальних та енергетичних ресурсів, а також захист навколишнього середовища від забруднення були та залишаються пріоритетними напрямками сучасної економіки України.

Метою цієї роботи є розробка гранулятора для переробки деревних відходів та його використання в повсякденному житті.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ОТРИМАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ

1.1 Загальні відомості про паливні гранули

Паливні гранули – це вид біопалива, отриманий з деревних відходів, торфу або інших видів біомаси [6, 7]. Ці гранули є геометричними елементами стандартного розміру та являють собою екологічно чисте паливо з низьким вмістом золи. При спалюванні гранул біомаси в атмосферу викидається така ж кількість вуглекислого газу (CO2), яку поглинула рослина під час свого росту.

Використання паливних гранул є гарною альтернативою безпосередньому спалюванню сирого палива (деревних відходів, меленого торфу тощо) у топках котлів. Паливні гранули концентрують більше тепла, ніж сире паливо для прямого спалювання в топках котлів, що підвищує ефективність котельні, вимагає менше місця для зберігання та менш схильні до самозаймання під час зберігання. Вони також не містять пилу або спор, які можуть викликати алергічні реакції.

Паливні гранули відрізняються від сировини високою сухістю (8–12% вологості порівняно з 30–65% для сирого палива) та щільністю, яка приблизно в півтора рази більша. Ці якості забезпечують високу теплотворну здатність порівняно з необробленою сировиною [8].

Отже, основними характеристиками, що відрізняють паливні пелети від високоякісного палива, є:

Висока калорійність: Паливні пелети мають калорійність, порівнянну з калорійністю високоякісного вугілля, і, залежно від технології виробництва та компонентів, коливається від 2800 до 4500 ккал/кг;

Однорідність: Завдяки технології виробництва паливні пелети мають стабільний фракційний склад і щільність, що робить їх однорідним паливом,

простота використання та потенціал автоматизації якого порівнянні з рідким та газоподібним паливом;

Мінімальні витрати на транспортування та зберігання: Витрати на транспортування та зберігання паливних пелет значно нижчі, ніж у сирого палива.

Ефективність використання: Техніко-економічні показники установок, що використовують паливні пелети (котли, газогенератори), вищі, ніж у тих, що використовують сире паливо.

Зменшення шкідливих викидів: При спалюванні паливних пелет, основним компонентом яких зазвичай є біомаса, викиди шкідливих речовин значно нижчі, ніж при спалюванні традиційного викопного палива (наприклад, вугілля).

Сировиною для пелет можуть бути деревні відходи (кора, тирса, тріска та інші лісозаготівельні залишки), торф, сільськогосподарські відходи (стебла кукурудзи, солома, залишки зернового виробництва, лушпиння соняшнику), лігнін, вугілля та інші речовини.

Наразі вітчизняні виробники пелет, що постачають продукцію (брикети, пелети) на експорт, дотримуються європейських стандартів. Стандарти на паливні пелети в Україні базуються на європейських стандартах, зокрема ДСТУ EN 15234-2:2013: Забезпечення якості пелет для непромислового споживання; ДСТУ EN 15210-1:2013: Визначення механічної міцності пелет; та ДСТУ 8358:2015: Технічні умови на деревні пелети.

Деревні пелети (паливні гранули) є одним з небагатьох альтернативних видів палива, що використовуються для опалення житлових будинків та підприємств. З огляду на зростання цін на газ, нафту та вугілля, використання паливних пелет є економічно вигідним та екологічно безпечним.

Важливим аспектом є те, що деревина, яка діє як природний акумулятор, накопичує велику кількість сонячної енергії під час свого росту. Паливні гранули є одним з найбільш екологічно чистих видів палива. Вони не тільки не забруднюють навколишнє середовище, але й вирішують проблему утилізації де-

ревних відходів. Випускаються у вигляді пелет діаметром 6-10 мм та довжиною 1-5 см. У Швеції компанії виробляють пелети діаметром 25 мм. Порівняно з іншими видами палива, паливні пелети під час горіння викидають в атмосферу в десятки разів менше вуглекислого газу.

Паливні пелети вважаються вуглецево-нейтральним паливом, оскільки під час горіння виділяється така ж кількість вуглецю, як і під час розкладання деревини. Вміст золи в паливних пелетах у 15-20 разів нижчий, ніж у вугіллі. Кількість сірки та азоту в деревних пелетах мінімальна, а при ефективному горінні вміст оксиду азоту та діоксиду сірки в димових газах надзвичайно низький.

В Україні розроблено систему сертифікації ENplus для паливних пелет.

Близько 85% української продукції експортується до європейських країн. Наразі річне виробництво деревних пелет в Україні сягає приблизно 500 000 тонн, що еквівалентно сумарному виробництву паливних пелет із соломи та соняшнику [4]. Український ринок цієї продукції перебуває на ранній стадії розвитку та зростає зі швидкістю від 15% до 20% щорічно. Варто зазначити, що близько 3 мільйонів кубічних метрів деревних відходів залишаються невикористаними, що свідчить про потенціал для їх утилізації.

Якщо розглядати інші джерела сировини, Україна має потужність виробляти від 3,5 до 4 мільйонів тонн на рік. Збільшення виробництва також сприятиме використанню енергії для виробництва пелет, що може розширити сировинну базу [2].

Використання місцевих ресурсів дозволяє нам зменшити залежність України від газу зі сходу. Забезпечення надійного енергопостачання збільшить наше виробництво та використання деревних пелет як заходу енергетичної безпеки.

Сировиною для деревних пелет можуть бути:

- Деревні відходи (тирса, стружка тощо); - Енергетична верба;

- Гілки дерев після вирубки зелених насаджень.

Крім того, одним із компонентів для виробництва пелет є високорослa деревина, така як тополя, верба, міскантус та інші.

В Україні найбільш придатною рослиною для цієї мети є енергетична верба (Salix viminalis). Її продуктивність коливається від 10 до 15 тонн сухої речовини з гектара на рік, що в 14 разів перевищує вихід деревини у звичайних плантаціях [7].

Заготівля проводиться один раз на три роки протягом 35 років, після чого землю можна пересаджувати під інші культури або під нову плантацію енергетичної верби. Важливо зазначити, що нестійкі сільськогосподарські угіддя можна використовувати для вирощування винограду. Більше того, порівняно з вирощуванням ріпаку, виноград не виснажує ґрунтові ресурси.

Високоякісні деревні пелети (білі та сірі) використовуються для спалювання в невеликих котлах та печах для опалення житлових будинків. Зазвичай вони продаються в мішках по 15-20 кілограмів. Попит на деревні брикети та пелети, а також на котли для їх спалювання, зростає пропорційно до ціни на викопне паливо, таке як нафта та газ.

У деяких європейських країнах, таких як Швеція, де ринок альтернативних джерел енергії більш розвинений, енергетичні пелети використовуються для опалення понад 50% житлових будівель [15].

Їх широке використання також пояснюється екологічними перевагами цього виду палива: при спалюванні викиди вуглекислого газу такі ж, як і при поглинанні цього газу деревиною, а викиди оксиду азоту зменшуються завдяки сучасним технологіям спалювання.

Темні паливні пелети з високим вмістом залишків спалюються у потужних котлах для виробництва тепла та електроенергії для житлових будинків та підприємств. Темні пелети можуть мати більший діаметр, ніж білі пелети, і продаються партіями по дві тисячі тонн і більше.

Пелети доступні в таких типах:

- Преміальні білі легкі паливні пелети виготовляються з деревини без до-

давання кори;

- Промислові пелети: різновид нижчої якості, що включає кору дерев та негорючі залишки. Їх теплопровідність трохи нижча, ніж у преміальних пелет;

- Сільськогосподарські пелети, компонентами яких є гречані рештки та насіння соняшнику. Вони чорного кольору. Їхня головна перевага – низька ціна.

1.2 Загальні відомості про гранулювання

Грануляція – це процес переробки матеріалів (деревини, металів, пластмас, кормів для тварин тощо) на геометрично правильні, однорідні шматки однорідної маси: гранули (пелети) [10].

Загалом, грануляція може базуватися на ущільненні матеріалів (з використанням або без використання сполучних речовин), диспергуванні та подальшій кристалізації розплавів або розчинів, або подрібненні великих шматків у дробарках.

Основними показниками ефективності грануляції є вихід (умовної) фракції продукту, якість отриманих гранул (форма, міцність, насипна щільність) та однорідність розподілу частинок за розміром. Процес може здійснюватися з поверненням дрібних частинок на стадію грануляції (зворотна грануляція) або без неї (беззворотна грануляція).

Грануляція включає такі основні технологічні етапи: підготовка вихідної сировини, дозування та змішування компонентів, а також сама грануляція (прокатування, пресування, диспергування тощо). Формування структури (сушіння, термостатування, полімеризація тощо); класифікація (розподіл частинок за розміром) та подрібнення великих фракцій з подальшим відділенням товарного продукту [12].

Для гранулювання різної сировини можуть використовуватися різні методи та обладнання. Розрізняють такі методи гранулювання:

- сферонізація (утворення гранул шляхом агломерації або стратифікації частинок);

- диспергування рідини у вільному об'ємі або в нейтральній системі (утворення та кристалізація крапель рідини при охолодженні на повітрі, в олії тощо);

- пресування сухих порошків для отримання брикетів, плиток тощо з подальшим їх подрібненням на гранули необхідного розміру;

- диспергування рідини на поверхні частинок у зваженому стані (кристалізація тонких плівок на поверхні частинок);

- видалення окалини (охолодження рідини на сторонній поверхні);

- формування або екструзія (екструзія пастоподібної маси через отвори). Залежно від методу грануляції розрізняють такі типи фізичних та механічних зв'язків між частинками [12]:

1) Когезійно-адгезійні зв'язки між частинками (пресування, обгортання зволожених порошкових частинок та екструзія зволоженої суміші або нагрітих порошкових матеріалів з низькоплавким компонентом через фільєри).

2) Капілярно-адсорбційні сили адгезії між частинками, викликані дією гідростатичного тиску рідкої фази в порах (капілярах) та поверхневого натягу в місцях контакту плівок (грануляція шляхом обгортання зволожених порошкових частинок).

3) Зв'язки у вигляді містків та кристалічних з'єднань утворюються під час кристалізації солей з розчинів, суспензій та розплавів (грануляція шляхом затвердіння крапель розплаву у вільному об'ємі та кристалізації розчину або пульпи на поверхні твердих частинок).

1.3 Аналіз обладнання для гранулювання

Грануляція сипучих матеріалів здійснюється двома основними методами: стисненням та пресуванням, вибір яких залежить від фізичних, механічних та

розмірних властивостей сировини [17].

Компресійна грануляція передбачає формування гранул шляхом агломерації рівномірно зволожених частинок або шляхом нашарування сухих частинок на вологі ядра, які виступають центрами грануляції. Цей метод ефективно використовується для гранулювання мінеральних добрив, наприклад, за допомогою дискових грануляторів, призначених для обробки порошкоподібних матеріалів. Однак для органічних добрив цей метод виявився непрактичним через необхідність значного подрібнення вихідної сировини до частинок розміром до 300 мікрон, що тягне за собою значні витрати енергії.

Пресова грануляція, залежно від вологості матеріалу, поділяється на суху та вологу.

Сухе пресування проводиться при вологості сировини від 16 до 30% і передбачає ущільнення та затвердіння матеріалу під високим тиском, подальше подрібнення гранул та класифікацію продукту. Цей метод широко використовується в прес-грануляторах з кільцевими або плоскими матрицями. У цих пристроях ролики обертаються на матриці, продавлюючи гранули через її отвори. Однак через нерівномірні окружні швидкості роликів і матриці можливий нерівномірний знос їх поверхонь.

Мокре пресування використовується для матеріалів з вологістю від 30 до 50%. Цей метод забезпечує формування гранул завдяки пластичності зволоженої сировини, що знижує витрати на подрібнення та полегшує процес гранулювання. Для сухого пресування використовуються різні типи обладнання:

Кільцеві або плоскі матриці: гранули формуються під дією обертових роликів, які стискають матеріал.

Шестеренні гранулятори: Під час обертання зубчастих матриць матеріал заповнює міжзубний простір і ущільнюється в каналах матриці, утворюючи гранули розміром 10–14 мм. Поршневі преси: Вони забезпечують високу силу пресування (120–150 МПа) і використовуються для виробництва брикетів середнього та великого розміру. Недоліками цього обладнання є високе енерго-

споживання, швидкий знос заготовок через абразивний вплив частинок сировини та обмежений діапазон розмірів продукції.

Отже, вибір методу грануляції та обладнання залежить від властивостей сировини, економічних умов виробництва та вимог до кінцевого продукту.

Роликові формувальні преси характеризуються високою продуктивністю та здатністю створювати значний тиск пресування, що досягає 150 МПа. Оптимальна вологість матеріалу для пресування в цих машинах становить приблизно 18%. До цього типу обладнання належать дво- та чотиривалкові преси, що виробляються провідними компаніями різних країн, зокрема:

Німеччина: Köppern, Kleckner-Humboldt-Deutz, Tsemahh, Kremer-Baum, Korf, Верех;

Франція: Ledentiu, SayutConrer;

США: United States Steel, Komarek-Graves, AMRUTECH, Inc.;

Україна: Новокраматорський машинобудівний завод (НКМЗ), промислове дослідне виробництво Інституту чорної металургії імені С.І. Некрасова.

Однак, технологічні вимоги до низької вологості сировини (16-18%) та високого тиску (80-150 МПа) роблять сухе пресування дорогим та енергоємним процесом. Мокре пресування пропонує більш вигідний варіант для гранулювання органічних матеріалів. При вологості сировини 30% або вище та робочому тиску 3-10 МПа цей метод дозволяє:

- збільшити міцність гранул у 2,5-3,5 рази;
- зменшити крихкість у 1,5-3,5 рази порівняно із сухим пресуванням.

Це робить мокре пресування менш енергоємним та більш економічно ефективним методом отримання високоміцних гранул.

Грануляція мокрим пресуванням особливо підходить для матеріалів з високою дисперсністю частинок. Під час процесу пресування структура матеріалу модифікується під впливом механічного стиснення та зсуву, що забезпечує формування високоякісних гранул. Апаратна конструкція процесу мокрого пресування подібна до конструкції шнекових та дискових екструдерів, що до-

зволяє застосовувати досвід з інших галузей технології для його вдосконалення. Гранули, отримані пресуванням, поєднують високу дисперсію з міцною структурою, що робить їх стійкими до крихтування та агломерації.

Високошвидкісні гранулятори призначені для виробництва щільніших та однорідніших гранул. Ці гранулятори мають невеликі розміри, зменшену масу та забезпечують високу питому продуктивність. У високошвидкісних грануляторах матеріал змішується шнеком з частотою обертання вала 1000–2500 хв$^{-1}$. У високошвидкісних грануляторних установках можна використовувати різні комбінації з іншими пристроями для створення різних варіантів гранульованих продуктів.

Пресування передбачає виробництво гранул у вигляді брикетів, плиток та таблеток шляхом ущільнення матеріалу, іноді з подальшим подрібненням пресованого матеріалу. Для пресування використовуються роликові преси, зубчасті роторні гранулятори та вальці. Шнековий прес (спіральний шнек) використовується для безперервної подачі вихідного матеріалу та його попереднього ущільнення [12].

Екструзія полягає у формуванні гранул шляхом проштовхування пластично-в'язкої маси через головку екструдера за допомогою шнека, з подальшим різанням або подрібненням матеріалу. Під час грануляції біомаса подається в перфоровану обертову матрицю, пресується через її отвори та розрізається на гранули лезами [14].

Деревні відходи та торф найчастіше гранулюють у так званих матрицях-пресах. Matrice можуть бути кільцевими або плоскими. Притискні ролики проштовхують сировину через отвори у матриці. Циліндри, що утворюються на виході з матриці, розламуються на необхідну довжину.

Пресування може здійснюватися як у циліндричних матрицях-пресах, так і в плоских матрицях-пресах [12].

Висновки першого розділу

У цьому розділі аналізуються існуючі підходи до отримання та використання паливних гранул. Описано загальні відомості про паливні гранули та процес гранулювання. Розглянуто та проаналізовано обладнання для отримання паливних гранул.

2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Виробництво паливних пелет починається із сировини. До якості сировини для виробництва паливних пелет пред'являються менш жорсткі вимоги, ніж для виробництва інших деревних виробів. Коливання складу сировини, а також грибкові ураження деревної тріски менше впливають на якість паливних пелет.

В ідеалі сировина повинна містити мінімальну кількість кори (до 5%, бажано до 1%), оскільки збільшення кількості кори призводить до збільшення зольності пелет.

Крім того, сировина не повинна бути старою (простроченою), оскільки така сировина погано гранулюється, і паливні пелети мають нижчу енергетичну цінність. Вміст вологи перед пресуванням повинен бути від 12 до 14%. При вищій вологості пелети менш міцні, а залишкова вологість, зазвичай після охолодження, може бути вищою за норму. Ці пелети мають нижчу енергетичну цінність і, отже, нижчу вартість.

2.1 Характеристика сировини для виробництва паливних пелет

Як сировина для виробництва паливних пелет використовуються тирса (деревна тріска) з лісової промисловості [17].

Середня зважена густина деревної сировини, у кг/м³, визначається за такими формулами:

$$\rho_{умн} = \sum_{i=1}^{n} \rho_{умн}^{n} \cdot \frac{i_n}{100} \tag{2.1}$$

$$\rho_{умн}^{n} = \frac{100}{\frac{P_{др}}{\rho_{др}} + \frac{P_к}{\rho_к} + \frac{P_{гн}}{\rho_{гн}}}. \tag{2.2}$$

де $\rho_{умн}^{n}$ – середньозважена щільність породи, кг/м^3;

$\rho_{др}$, $\rho_{к}$, $\rho_{гн}$ – відповідно умовна щільність деревини, кори, гнили;

$P_{др}$, $P_{к}$, $P_{гн}$ – відповідно частка деревини, кори, гнилі в загальному обсязі сировини, %.

Частка деревини $P_{др}$ визначається за формулою

$$P_{др} = 100 - P_{к} - P_{гн} = 100\text{-}5\text{-}5 = 90\%, \quad (2.3)$$

де масова частка кори $P_{к}$ = 5%;

масова частка гнилі $P_{гн}$ = 5%.

Приймаємо густину умовну здорової деревини для сосни $\rho_{др}$=400 кг/м^3; для ялини $\rho_{др}$ = 400кг/м^3, для ясена $\rho_{др}$ = 525 кг/м^3. Приймаємо щільність умовну кори та її частку у загальному обсязі сировини для сосни $\rho_{к}$=253 кг/м^3, $P_{к}$ =5%, для ялини $\rho_{к}$=351 кг/м^3, $P_{к}$ =5 %, для ясена $\rho_{к}$=337кг/м^3, $P_{к}$ = 5%.

Визначимо щільність умовну гнилі $\rho_{гн}$, кг/м^3, за формулою:

$$\rho_{гн} = 0,65 \cdot \rho_{др} \quad (2.4)$$

де приймаємо для сосни $\rho_{гн}$=260 кг/м^3; для ялини $\rho_{гн}$=260 кг/м^3, для модрини $\rho_{гн}$=341,25кг/м^3.

Тоді, для сосни середньозважена щільність $\rho_{умн}^{сосни}$, кг/м^3, буде мати значення

$$\rho_{умн}^{сосна} = \frac{100}{\frac{90}{400} + \frac{5}{253} + \frac{5}{260}} = 380,2 \text{ кг/м}^3$$

Середньозважена щільність для ялини $\rho_{умн}^{ялини}$, кг/м^3

$$\rho_{умн}^{ялина} = \frac{100}{\frac{90}{400} + \frac{5}{351} + \frac{5}{260}} = 387{,}5 \text{ кг/м}^3$$

Середньозважена щільність для ясена $\rho_{умн}^{ясена}$, кг/м^3

$$\rho_{умн}^{ясен} = \frac{100}{\frac{90}{525} + \frac{5}{337} + \frac{5}{341{,}25}} = 502{,}5 \text{ кг/м}^3$$

Середньозважена щільність при прийнятих та прорахованих значеннях виходить:

$$\rho_{умн} = 380{,}2\frac{60}{400} + 387{,}5\frac{30}{400} + 502{,}5\frac{10}{400} = 394{,}62 \text{ кг/м}^3$$

Середньозважена щільність за визначеної вологості деревної сировини ρ_w, кг/м^3, визначається за формулою

$$\rho_w = \sum_{i=1}^{n} \rho_w^n \cdot \frac{i_n}{100} \qquad (2.5)$$

$$\rho_w^n = \frac{100}{\frac{P_{др}}{\rho_{др}^w} + \frac{P_к}{\rho_к^w} + \frac{P_{гн}}{\rho_{гн}^w}}, \qquad (2.6)\backslash$$

де ρ_w^n – середньозважена щільність однієї породи при вологості W, кг/м^3;

$\rho_{др}$, $\rho_{к}$, $\rho_{гн}$ — відповідно щільність умовна здорової деревини, кори, гнилі при вологості;

$P_{др}$, $P_{к}$, $P_{гн}$ – відповідно частка здорової деревини, кори, гнилі загальному обсязі сировини, %.

Приймаємо для ясена $\rho_{др}^{w}$=963 кг/м^3, $\rho_{к}^{w}$=607кг/м^3; для сосни $\rho_{др}^{w}$=740 кг/м^3, $\rho_{к}^{w}$=456 кг/м^3, для ялини $\rho_{др}^{w}$=733кг/м^3, $\rho_{к}^{w}$=631 кг/м^3, тоді отримуємо, що щільність середньозважена деревної сировини при визначеній вологості буде мати значення

$$\rho_{w}^{сосни}=\frac{100}{\frac{90}{740}+\frac{5}{456}+\frac{5}{481}}=709{,}2 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{w}^{ялини}=\frac{100}{\frac{90}{733}+\frac{5}{631}+\frac{5}{476}}=719{,}4 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{w}^{ясена}=\frac{100}{\frac{90}{963}+\frac{5}{607}+\frac{5}{626}}=925{,}9 \text{ кг/м}^3$$

З розрахунків випливає, що щільність середньозважена сировини безпосередньо залежить від вологості.

2.2 Опис технологічного процесу виробництва паливних гранул

Паливні гранули – це циліндричні гранули стандартного розміру, виготовлені з пухкої деревини шляхом пресування, зі зв'язуючим речовиною або без неї. Технологія гранулювання без зв'язуючих речовин є більш поширеною, оскільки вона дозволяє виробляти екологічно чисті паливні гранули.

Паливні гранули займають у три-чотири рази менше місця, ніж, наприклад, тирса (видима вага тирси становить 150–200 кг/м³, тоді як у паливних гранул – 650 кг/м³). Гранулювання пухких відходів (тирси, деревної стружки тощо) підвищує їх калорійність за рахунок збільшення їхньої щільності. Високоякісні деревні гранули (білі та сірі) використовуються для опалення будинків шляхом спалювання в невеликих котлах, печах та камінах. Темні гранули з високим вмістом кори спалюються у більших котлах для виробництва тепла та електроенергії для побутового та промислового використання. Гранулювання відходів має ряд переваг порівняно з використанням їх у первісному вигляді. По-перше, це збільшує вантажопідйомність транспортних засобів та покращує виробничі практики. Паливні гранули прості у використанні, очищенні та можуть спалюватися в доменних печах та камінах, а також використовуватися для опалення будинків та громадських будівель.

Для виробництва паливних пелет подрібнена деревна маса повинна мати вологість 8-10% та розмір частинок до 4 мм. Міцність паливних пелет забезпечується лігніном, що міститься в клітинах деревини, а їхня щільність – високим тиском (800-1400 кгс/см³). Згідно з європейськими стандартами, паливні пелети можуть мати довжину до 50 мм та діаметр 6-10 мм.

Паливні пелети транспортуються всіма типами критих контейнерів (бункерами, тюками). Їх зберігають у приміщенні на стелажах будь-якого типу, що запобігають потраплянню вологи. Процес виробництва паливних пелет включає: збір сировини, подрібнення на тріску та дрібну фракцію, зберігання, молоткове подрібнення на шрот, видалення мінеральних та металевих домішок, сушіння та пресування, а також подальше зберігання готової продукції. Паливні пелети можуть бути упаковані в поліетиленові або паперові пакети. Структурна схема виробництва паливних пелет показана на рисунку 2.1 та включає операції отримання та підготовки сировини, сушіння, повторного подрібнення, гранулювання та охолодження.

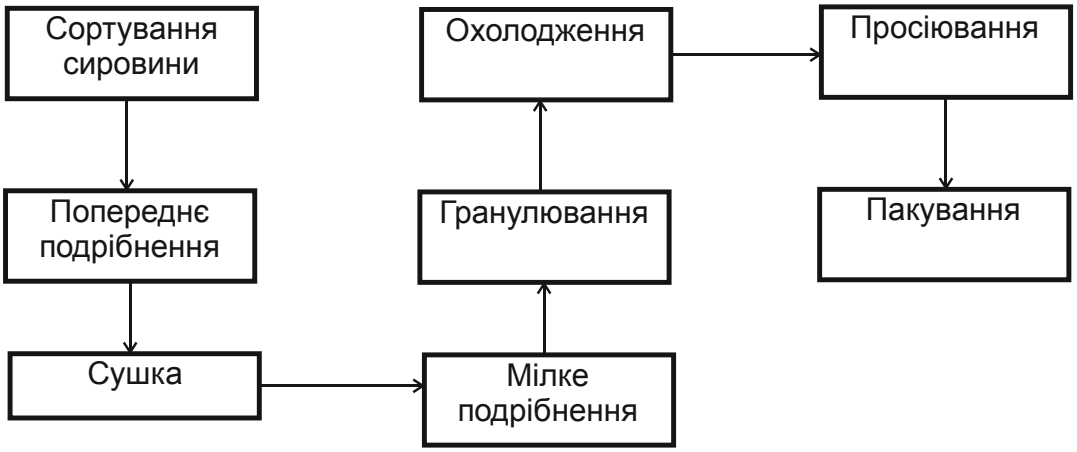


Рисунок 2.1 – Схема технології виробництва паливних гранул

Виробництво паливних пелет включає кілька етапів: підготовку сировини (дроблення, сушіння), гранулювання (пресування в гранули), охолодження та пакування. Цей процес забезпечує високу енергоефективність та екологічність.

Підготовка сировини: Сировина (деревина, солома, торф, сільськогосподарські відходи) збирається та сортується, видаляючи домішки (камені, метал, сміття).

Подрібнення: Сировина подрібнюється до розміру частинок приблизно 3–5 мм (це забезпечує рівномірне пресування та адгезію частинок). Чим менший розмір частинок, тим вища якість паливних пелет. Відходи подрібнюються за допомогою дробарно-подрібнювальних установок до розмірів менше 25 × 25 × 2 мм. Це дозволяє швидко та ефективно сушити сировину та готувати її до подальшого подрібнення на частинки необхідного розміру. Використовуються молоткові млини з ситами або без них. Секція гранулювання повинна отримувати сировину з необхідною вологістю та розміром частинок. Тому після сушіння сировини розміром менше 25×25×2 мм відбувається другий етап: сировина подрібнюється на частинки розміром менше 4 мм. Завдяки цим двом етапам можна отримати більш однорідну сировину та зменшити загальне споживання електроенергії.

Сушіння. Для ефективного пресування вологість сировини має бути приблизно 10–15%. Якщо сировина волога, її сушать у спеціальних сушарках. Для отримання високоякісних паливних гранул необхідно використовувати сировину з вологістю 8–12%. Відходи з вологістю вище 15% важко пресувати, особливо за допомогою круглофіброві пресів. Для сушіння сировини використовуються два типи сушильних камер: барабанні та стрічкові. Барабанні сушарки використовуються для сушіння дрібних відходів (тирса, стружка тощо), а стрічкові – для подрібнених гранульованих відходів. Якщо барабанна сушарка використовується для сушіння грудкуватих, подрібнених відходів, ефективність процесу сушіння знижується. При сушінні дрібних відходів температура становить приблизно 60%. Температура на вході в барабанну камеру може досягати 600°С.

У цьому типі сушарок напрямок руху сушильного агента та сировини збігається, тому перегрів призводить до потемніння сировини та часткового руйнування лігніну. В результаті, після пресування гранули погано тримаються разом і кришаться. Через особливості конструкції, сушити обрізки в стрічковій сушарці неможливо, тому перед пресуванням встановлюються подрібнювачі. Температура на вході в стрічкову сушарку становить 200°С. Оскільки сушильний агент рухається проти потоку сировини, підвищення температури вище 200°С може призвести до займання сировини.

Кондиціонування. Під час пресування паливних гранул відбувається механічне зчеплення частинок через неправильну форму та подрібнення, а також процес полімеризації лігніну. Це дозволяє гранулам зберігати свою форму та щільність. Полімеризація лігніну вимагає тиску, температури, певної кількості води та деформації зсуву. Тому необхідне попереднє пресування, яке передбачає додавання пари та води до подрібненої сировини. Для м’яких та хвойних порід достатньо простого додавання води. Робота гранулятора без системи кондиціонування дозволяє отримувати гранули хорошої якості, але зменшує час роботи пресувальних агрегатів (матриці та роликів) та додаткове спожи-

вання енергії. Це пояснюється тим, що нагрівання та розм'якшення сировини відбуваються в результаті механічної дії роликів та матриці.

Пресування (гранулювання). Сировина подається в гранулятор, спеціальну машину з матрицею та роликами, яка формує циліндричні паливні гранули з підготовленої сировини. Пресування здійснюється під високим тиском, без додавання клеїв (завдяки лігніну, природному сполучному речовині в деревині). Під високим тиском і температурою деревина виділяє екстрактивні речовини, які мають здатність зв'язуватися. Через пресувальну насадку отримують пресовану масу деревини в кругляках. Згодом, за допомогою ділильного пристрою, маса розділяється на гранули довжиною до 50 мм.

Гранулятор є найважливішим обладнанням для виробництва паливних гранул, і весь процес залежить від його роботи. Існують гранулятори з плоскою та круглою матрицею. Принцип роботи грануляторів з круглою матрицею такий самий, як і у плоских млинів. Матриця являє собою порожнистий циліндр з перфорацією певного діаметра в його стінках. Висота перфорованої області повинна бути меншою за ширину роликів. Ролики рухаються вздовж внутрішньої сторони стінок, а лопаті — вздовж зовнішньої. Під час роботи гранулятора необхідно зволожувати сировину, оскільки суха, подрібнена деревна маса погано підходить для процесу гранулювання. Однак споживання води гранулятором дуже низьке, тому його вартість не враховується в економічному розрахунку.

Охолодження паливних гранул: Після гранулювання паливні гранули досягають високої температури та стають м’якшими, тому їх охолоджують для затвердіння, а потім зберігають. Під час пресування сировина досягає значної температури, тому її потрібно охолоджувати. Цей процес відбувається в охолоджувачі та регулюється регулюванням розміру отворів. У охолоджувачі гранули охолоджуються, висихають і досягають своєї кінцевої щільності. Повільне охолодження збільшує щільність гранул. Кінцева вологість становить 9±2%.

Просіювання та класифікація. Пилоподібні та надмірно дрібні частинки видаляються для забезпечення однорідного розміру гранул. Під час розділення

дефектні гранули та пил видаляються та повертаються безпосередньо до гранулятора або секції кондиціонування. Видалення пилу покращує зовнішній вигляд продукту.

Упаковка та зберігання. Заключний етап виробництва паливних гранул. Паливні гранули транспортуються насипом, у мішках по 10-20 кг та у великих мішках. Технічні гранули транспортуються насипом, тоді як високоякісні гранули транспортуються рідше. Упаковка в мішки по 10-20 кг дуже практична та призначена для кінцевого споживача. Ці мішки транспортуються на піддонах. Місткість одного піддону становить 1 тонну. Біг-беги призначені для промислового транспортування сипучих матеріалів. Кожен з цих мішків містить від 1 до 1,5 тонн паливних гранул. Вони використовуються для спрощення транспортування та збереження вологи. Пакувальний цех обладнаний вантажними рампами для транспортних засобів, вантажними рампами з дозаторами для наповнення великих мішків та агрегатом для малих мішків.

Висновки другого розділу

У цьому розділі роботи описано характеристики сировини для виробництва паливних гранул. Запропоновано відповідний технологічний процес та описано його етапи.

3 РОЗРОБКА ПОБУТОВОГО ГРАНУЛЯТОРА

Існують різні типи та конструкції грануляторів. Їх можна класифікувати за такими характеристиками [20]:

За призначенням:

- для кормів для тварин;
- для грануляції полімерів;
- для виробництва паливних гранул;
- для екструзії відходів.

За типом приводу:

- з редуктором;
- з ремінним приводом.

У грануляторах з редукторами роботу виконує редуктор, і, в свою чергу, залежно від типу редуктора, ці гранулятори можна розділити на:

- одноступінчасті;
- двоступінчасті.

За типом матриці:

- кільцева матриця;
- плоска матриця.

За розташуванням матриці:

- вертикальна;
- горизонтальна.

Однак гранулятори зазвичай поділяють на кільцеві та плоскі матриці. У плоскому грануляторі, якщо виходить з ладу підшипник, можна замінити не один ролик, а всі. Однак ролик зазвичай зношується, але не виходить з ладу повністю, а заміна підшипника відбувається дуже швидко, займаючи лише півгодини.

Заміна плоскої матриці гранулятора займає від 15 до 20 хвилин. Це можливо завдяки швидкому доступу до робочих частин. Цей гранулятор забезпечує

безперервне виробництво гранул 24 години на добу, на відміну від кільцевої матриці, яку необхідно часто зупиняти для очищення матриці.

Загальновідомо, що кількість підшипників у механізмі суттєво впливає на плавність роботи та зменшує навантаження. Плоска матриця гранулятора має вал, на якому зібрані всі деталі. Порівнюючи кількість підшипників, встановлених на головному валу плоскої матриці гранулятора та кільцевої матриці гранулятора, перший має 4, а другий – 2. Отже, плоска матриця гранулятора забезпечує плавнішу роботу механізму.

3.1 Вибір типу гранулятора

Переваги плоских грануляторів у виробництві паливних пелет пов'язані з їх конструктивними характеристиками та технологією пресування. Основними перевагами цього типу грануляторів є:

Простота конструкції. Плоска матриця має відносно просту та надійну конструкцію, що полегшує обслуговування та ремонт.

Вища якість гранул. Пелети, вироблені за допомогою плоскої матриці, зазвичай мають більш однорідну форму та щільність, що покращує їхню якість та горіння.

Кращий контроль розміру гранул. Плоска матриця полегшує регулювання діаметра та довжини гранул шляхом зміни розміру отвору.

Знижений ризик заклинювання. Порівняно з грануляторами з кільцевою матрицею, плоскі матриці представляють менший ризик заклинювання матеріалу під час гранулювання.

Енергоефективність на низьких швидкостях. Плоскі матриці ефективно працюють на нижчих швидкостях вальців, зменшуючи споживання енергії та навантаження на механізми.

Універсальність. Підходять для виробництва пелет з широкого спектру сировини, від деревних відходів до сільськогосподарських залишків.

Легка заміна матриці. Завдяки своїй простій конструкції, заміна та відновлення матриці відбувається швидко та потребує менше часу. Плоскі матриці найкраще підходять для малих та середніх виробництв, де важливі якість пелет та простота експлуатації. Саме тому ми обрали саме цей дизайн.

Метою цієї магістерської роботи є розробка прототипу прес-гранулятора для побутового використання.

Технічні характеристики прес-гранулятора:

- Продуктивність (кг/год): 75-100
- Розмір частинок сировини (мм): 1-5
- Температура сировини перед гранулюванням: 20-50 °C
- Температура гранул на виході: 90-150 °C
- Потужність електродвигуна: до 4 кВт
- Швидкість обертання матриці: 100-120 об/хв.

3.2 Компоновка конструкції гранулятора

Загальна компоновка гранулятора показана на рисунку 3.1 та [МРМА 25.00.00.000 ГК].

Усі пресові вузли встановлені на рамі 1. Це зварена рама з швелера (номер 10). Рама спирається на чотири віброкріплення 14. Віброкріплення використовується для надійного закріплення та вирівнювання преса на нерівних поверхнях. Регулювання висоти кріплення дозволяє вирівняти обладнання. Віброкріплення складається з гумометалевого елемента, який ізолює прес як від активних, так і від пасивних вібрацій. Кріплення кріпляться до рами контргайками.

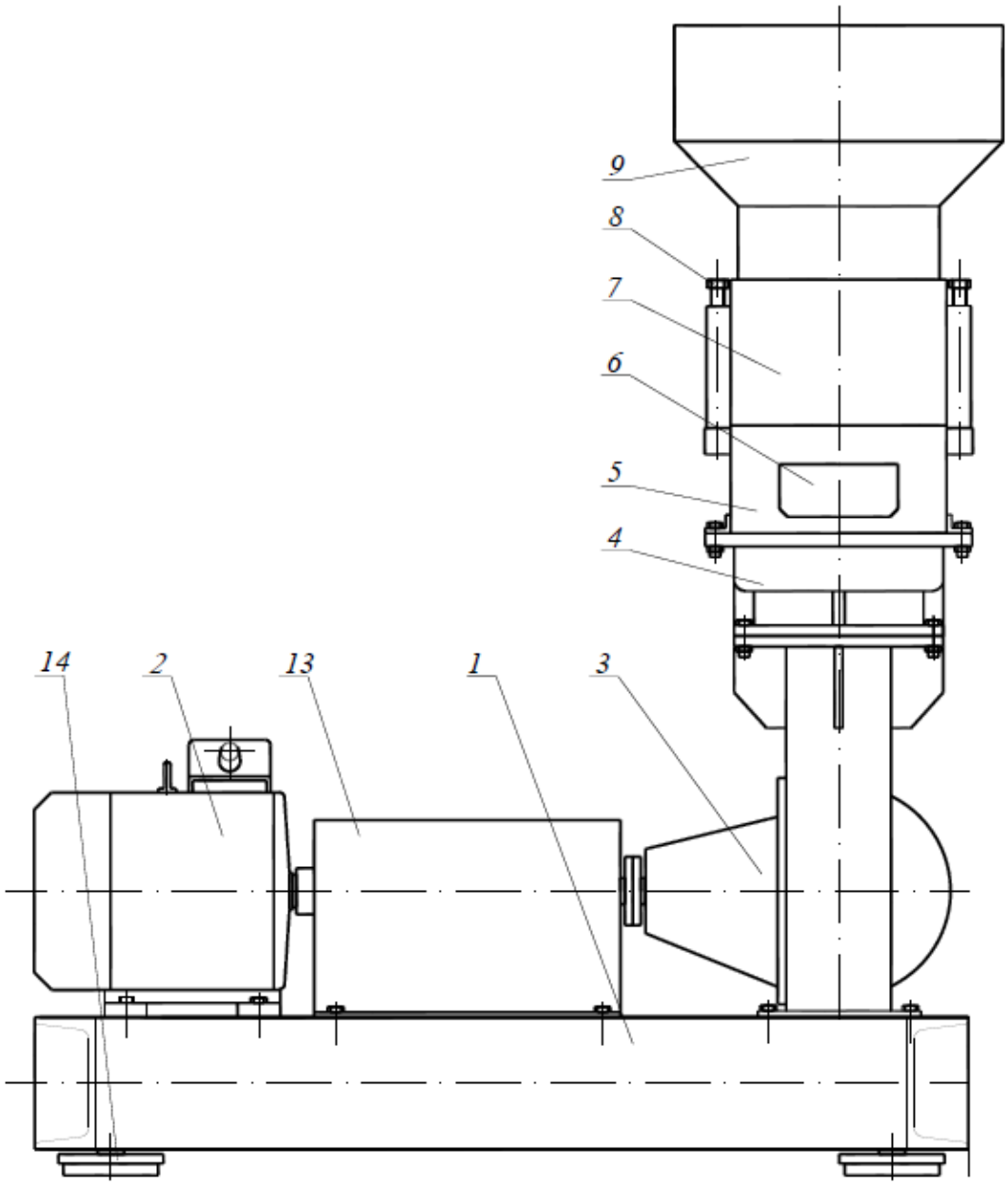


Рисунок 3.1 - Компоновка прес-гранулятора

Перед запуском преса переконайтеся, що всі опори рівномірно завантажені; в іншому випадку будь-які недовантажені опори необхідно вирівняти.

Привід гранулятора базується на триступінчастій конічній коробці передач. Вона взята із задньої осі легкового автомобіля. Головна пара шестерень гіпоїдна з передавальним числом 4,22. Гранулятор використовує лише одну вісь. Тому диференціал (його планетарні шестерні) заблокований. У корпус осі залита трансмісійна олива TAD-17. Вал шестерні з'єднаний з валом двигуна за допомогою універсального шарніра з двома поперечними шарнірами. Така

конструкція знижує вимоги до точності кріплення двигуна та коробки передач до шасі.

Від коробки передач крутний момент передається на вал гранулятора через шліцьовий вал, виточений з півосі відповідного автомобіля. Вали з'єднані один з одним муфтою.

Коробка передач встановлена по центру задньої осі. Бічні фланці центру вкорочені. До довшої (верхньої) сторони заготовки приварена пластина, до якої кріпиться корпус гранулятора 4.

На рисунку 3.2 показано вигляд зверху прес-гранулятора. Два притискні ролики 11 встановлені на нерухомому валу 12. Інтегровані заслінки на кінцях вала входять у напрямні пази. Сила тиску роликів на матрицю 10 регулюється болтами 8. Зазор між роликами та матрицею становить від 0,05 до 0,2 мм.

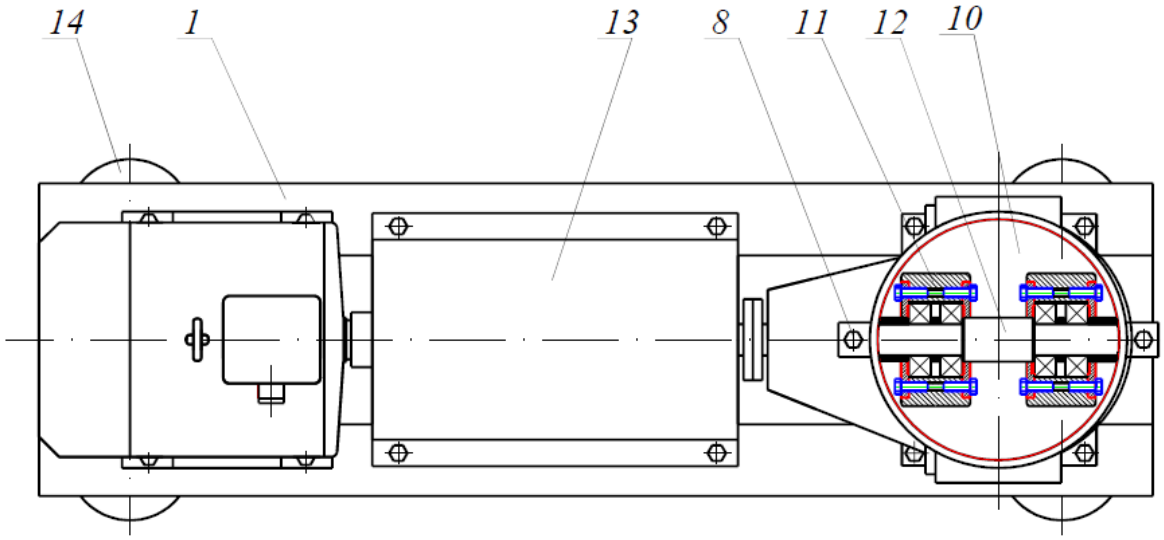


Рисунок 3.2 – Вид зверху прес-гранулятора

Завантажений матеріал потрапляє під канали та проштовхується через отвори матриці. Діаметр гранул дорівнює діаметру отворів матриці, а їхня довжина приблизно дорівнює відстані між матрицею та розвантажувальним диском. За необхідності встановлюється ріжуче лезо для скорочення довжини гранул. Гранули з розвантажувального диска викидаються через розвантажувальне вікно в контейнер під дією відцентрової сили.

Швидкість обертання каналів становить від 80 до 250 об/хв. Обертові ролики проштовхують частину сировини, що потрапила під ролик, через матрицю, утворюючи гранулу. У нижній частині циліндричного корпусу гранулятора розташований лоток для збору готових гранул.

3.3 Електрична схема приводу гранулятора

Гранулятор приводиться трьохфазним двигуном асинхронним з короткозамкнутим ротором. Електрична схема гранулятора приводу показана на рисунку 3.3 та [МРМА 25.00.00.000 Е3].

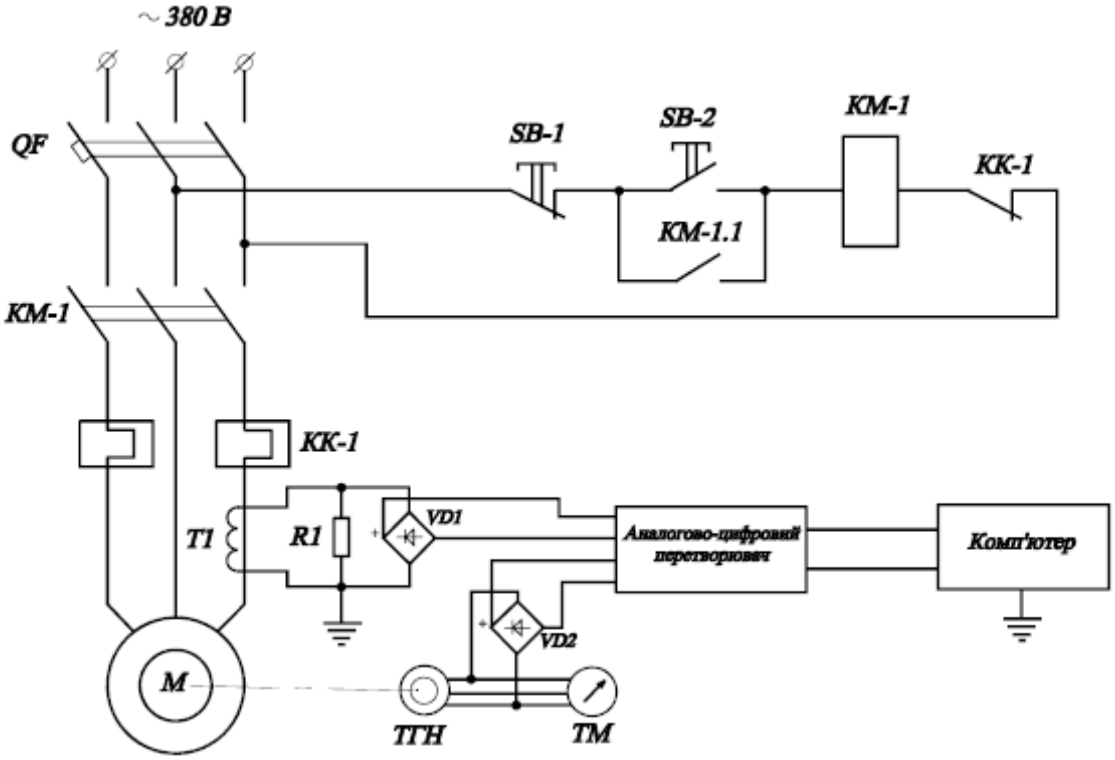


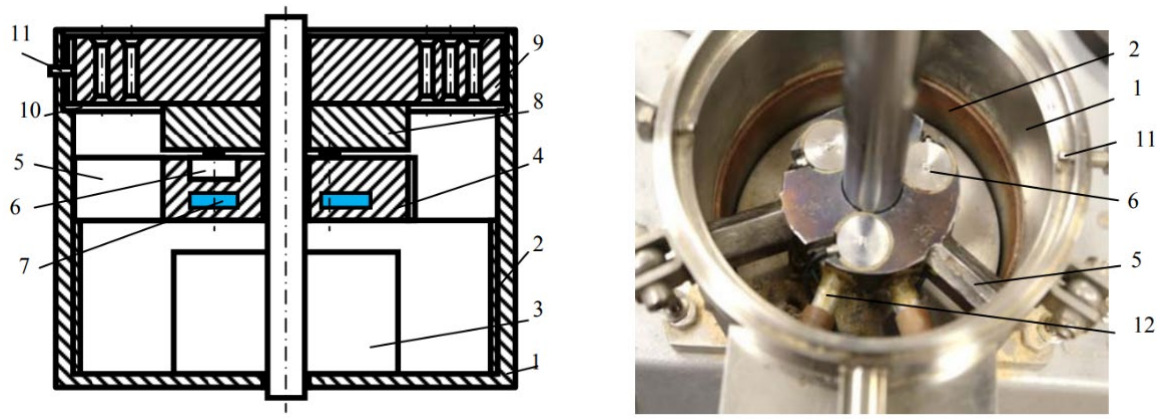
Рисунок 3.3 – Електрична схема гранулятора

Гранулятор підключено до джерела живлення 380 В. Підключення здійснюється через автоматичний вимикач QF. Гранулятор запускається за допомогою кнопки запуску SB-2. Одночасно котушка КМ-1 та контакти КМ-1 та КМ-1.1 замикаються. Струм подається на обмотки двигуна, і двигун запускається.

Для контролю роботи двигуна (навантаження) використовується система вимірювання струму та швидкості. Ці параметри обробляються аналого-цифровим перетворювачем та реєструються комп'ютером.

Для збору інформації про роботу преса ми використовуємо датчики сили (Decell SMM2-T1). Вони були обрані тому, що їхні компактні розміри та мала вага забезпечують оптимальні параметри для визначення сили стиснення. Тензодатчики розташовані в камері преса, під матрицею, та поглинають сили, що створюються роликами. Обробка сигналів виконується за допомогою станції DMS, яка приймає сигнали та відображає інформацію чисельно та графічно на комп'ютері в режимі реального часу. Дані, отримані від датчиків, обробляються на ПК за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Кільцева опора та вимірювальний стіл встановлені в пресувальній камері гранулятора, під матрицею, таким чином, щоб усі зусилля, що передаються від роликів матриці через пресувальний матеріал, повністю передавались на датчики зусилля (рис. 3.4). У нижній частині пресувальної камери 1 встановлена кільцева опора 2 з заглибленням 3 для подачі пресованих гранул. Круглий вимірювальний стіл 4 встановлений на опорі та підтримується трьома опорними ребрами 5, розташованими під кутом 120°. Три датчики зусилля 6, також розташовані під кутом 120°, встановлені на вимірювальному столі по концентричному колу. Плоский масив 9 спирається на датчики зусилля через пластину 8 та утворює зазор 10 з опорною поверхнею. Стандартний упор 11 захищає масив від скручування.



1 - нижня частина пресування камери; 2 - виріз прямокутний в опорному циліндрі;3 - кільцева опора;4 - вимірювальний стіл; 5 - опорні ребра вимірювального столу; 6 - датчик сили; 7 - канал для рідини охолоджуючої; 8 - плита опорна; 9 - матриця; 10 - зазор; 11 - стопор; 12 – штуцер

Рисунок 3.4 - Установка датчиків сили

Часові зміни від моменту пуску навантаження до виходу гранулятора в робочий режим показано на рис. 3.5. Зі збільшенням на матриці товщини шару і щільності пресованої сировини зусилля в каналах валків збільшується.

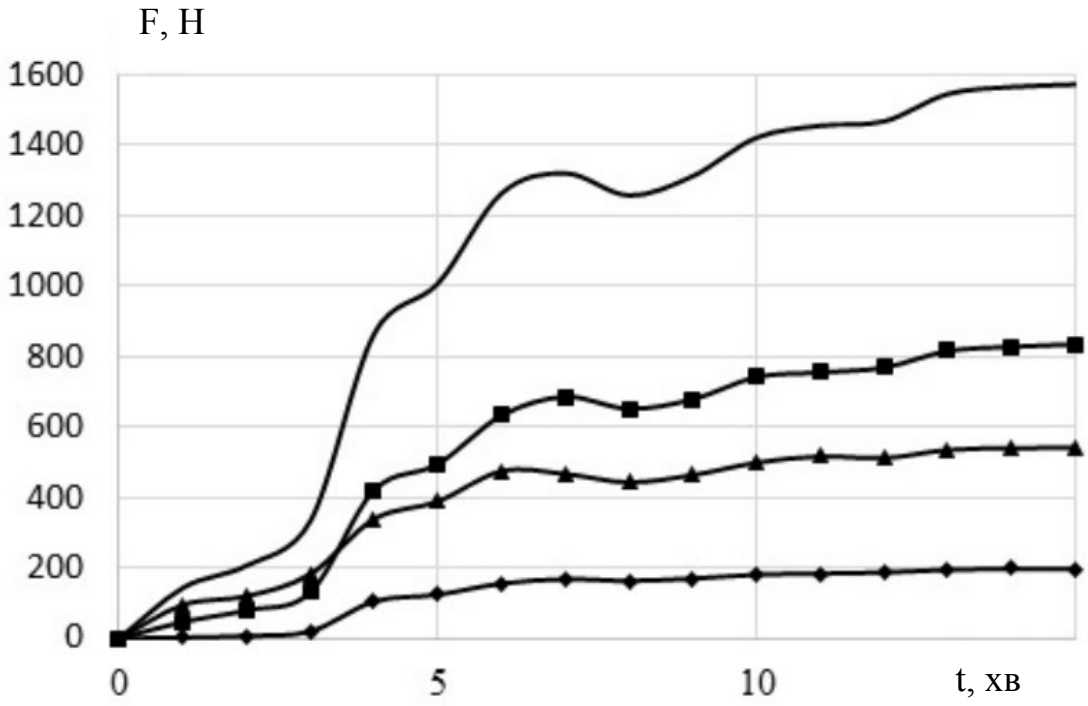


Рисунок 3.5 - Зміна пресуючого зусилля

Під час пресування на поверхні матриці утворюється шар сировини, товщина якого регулюється зазором між роликами та матрицею.

Ролики діють на шар лише у двох зонах, що являють собою увігнуті поверхні, розмежовані двома циліндричними сегментами. Інтенсивність напружень у кожній з цих зон є нелінійною. Площа контакту роликів із шаром розрахована на 0,000704 м².

Висновки третього розділу.

У цьому розділі представлено конструкцію гранулятора для виробництва паливних пелет з деревних відходів. Основними елементами запропонованого пристрою є плоска матриця, де безпосередньо відбувається грануляція, та притискні ролики, що забезпечують створення необхідного тиску на сировину. Також представлено електричну схему системи приводу гранулятора.

4 ВЗАЄМОДІЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПРИСТРОЮ З СИРОВИНОЮ В ПРОЦЕСІ ГРАНУЛЮВАННЯ

Отримання високоякісних гранул залежить від прикладеного тиску. Крім того, питома витрата енергії на гранулювання зростає з тиском пресування. Одночасно структурні властивості та форма матриць, пуансонів та роликів вирішально впливають на тиск пресування та споживання енергії. За цих умов неможливо оптимізувати конструктивні та технологічні параметри виробництва паливних гранул без комплексної математичної моделі, яка враховує найважливіші процеси пресування гранул [13].

Технологічний цикл виробництва паливних гранул включає подрібнення сировини для досягнення необхідної дисперсності, завдяки чому, виходячи з молоткового млина та проходячи через фільтри, частинки сировини мають відповідну форму та розмір, від порошку до частинок розміром 5 мм. Крім того, просторова орієнтація подрібнених частинок сировини, що надходять у прес-гранулятор, є хаотичною. Тому початкову масу сировини, підготовлену для технічних розрахунків з достатньою точністю для пресування, можна вважати порошком частинок будь-якої форми з однаковими фізичними властивостями в усіх напрямках. Виходячи з цього, всі суттєві технологічні параметри, що використовуються для розрахунків під час пресування порошку, стосуються сировини, отриманої шляхом пресування.

Для математичного опису процесу пресування було обрано теорію пружності та пластичності. Оскільки сировина, що використовується, має властивості, подібні до властивостей порошкоподібних матеріалів, її фізичні властивості виражаються межею пружності, модулем пружності, коефіцієнтом Пуассона та коефіцієнтом тертя сировини, стиснутої об стінку каналу.

Подальший процес формування гранул можна розділити на чотири послідовні фази:

1. Вирізання сировини зі стиснутого шару;

2. Вдавлювання нарізаної сировини через конічний отвір у циліндричний канал фільєри;

3. Екструдування сформованих гранул через циліндричний канал фільєри;

4. Вивантаження гранул з каналу фільєри.

4.1 Визначення тиску при вирізуванні сировини із стисненого шару

При переміщенні каналом механізму пресування матриці відбувається розрізання сировини діаметром D і товщиною ppr на товщину стисненого вихідного шару 2 (рисунок 4.1).

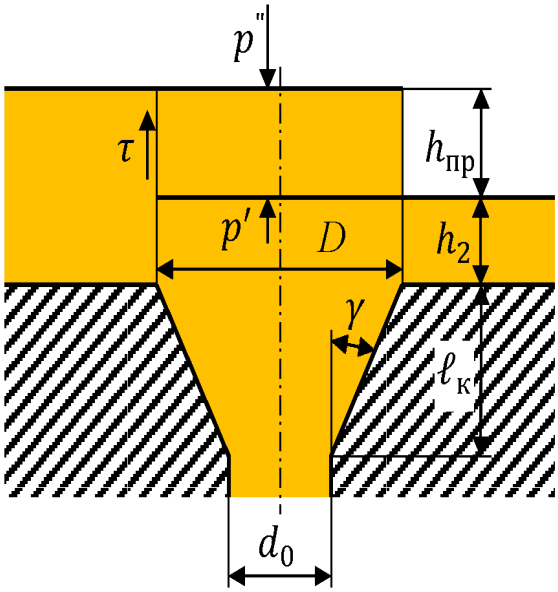


Рисунок 4.1 – Схема вирізки гранули

Нехай на площину верхню диска постійно діє тиск p'', на площину нижню тиск p', а на бічну поверхню дотичні напруження τ. Запишемо умову рівноваги диска:

$$\left(p'' - p'\right)\frac{\pi D^2}{4} - \tau\pi D h_{np} = 0 \qquad (4.1)$$

Звідси

$$\left(p'' - p'\right) = \Delta p_{вир} = \tau \frac{4h_{пр}}{D} \qquad (4.2)$$

Диск із сировини спресованої почне вирізатися, коли дотичні напруження τ досягнуть границі текучості σ_τ і вираз (4.2) перетворюється з урахуванням (4.3) на вигляд:

$$D = d_0 + 2l_к tg(\gamma) \qquad (4.3)$$

Діаметр D отвору вхідного каналу може бути виражений через діаметр d_0 каналу циліндричного матриці залежністю:

$$\Delta p_{вир} = \sigma_\tau \frac{4h_{пр}}{d_0 + 2l_к tg(\gamma)} \qquad (4.4)$$

4.2 Визначення тиску в конічному каналі

Схема визначення сил під час пресування дрібнодисперсної сировини через конічний канал у циліндричний показана на рисунку 4.2. Рух сировини в конічному каналі відбувається в зоні пластичної деформації.

Канал має форму усіченого конуса, тому для розрахунку використовується сферична система координат r, θ.

Верхньою межею діапазону об'ємної пластичної деформації є поверхня сфери з радіусом R1 та кутом при вершині конуса 2γ (рисунок 4.2), яка досягає переднього краю усіченого конуса з відповідним діаметром D, спираючись на краї вихідного отвору усіченого конуса діаметром 0. Зовнішня поверхня - це внутрішня конічна поверхня каналу.

Тиск p1 на верхній межі об'ємної пластичної зони визначався балансом енергії сил.

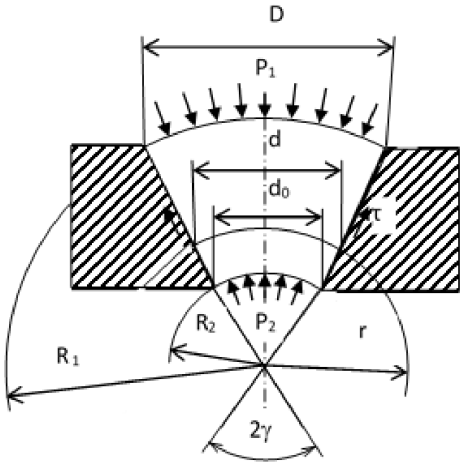


Рисунок 4.2 – Схема визначення сил на конічній ділянці каналу матриці

Протягом інтервалу часу Δt тиск p1 виконує роботу виштовхування, яка дорівнює Avisht. Avisht являє собою роботу, виконану конічним каналом Avisht, роботу сил тертя на внутрішній поверхні усіченого конуса Atr та роботу пластичної деформації дрібнодисперсної сировини в конічному каналі Apl.

Рівняння балансу енергетичного записується так:

$$A_{вишт}+A_{пл}+A_{вих}+A_{тр}=0 \qquad (4.5)$$

Рівняння балансу потужностей щодо визначення тиску на виході в ділянку конічну:

$$N_{вит}+N_{пл}+N_{вих}+N_{тр}=0 \qquad (4.6)$$

4.2.1 Визначення потужності пластичної деформації

Рівняння елементарного об’єму рівноваги [17]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_r}{\partial r}+\dfrac{1}{r\sin(\varphi)}\dfrac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi}+\dfrac{1}{r}\Big[2\sigma_r-\left(\sigma_\theta+\sigma_\varphi\right)+\tau_{r\varphi}ctg(\varphi)\Big]=0; \\ \dfrac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r}+\dfrac{1}{r\sin(\varphi)}\dfrac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \tau_{\theta\varphi}}{\partial \varphi}+\dfrac{1}{r}\Big[3\tau_{\theta r}+2\tau_{\theta\varphi}ctg(\varphi)\Big]=0; \\ \dfrac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial r}+\dfrac{1}{r\sin(\varphi)}\dfrac{\partial \tau_{\varphi\theta}}{\partial \theta}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \tau_{\varphi}}{\partial \varphi}+\dfrac{1}{r}\Big[3\tau_{\varphi r}-\left(\sigma_\theta-\sigma_\varphi\right)ctg(\varphi)\Big]=0. \end{cases} \quad (4.7)$$

Рівняння зв'язку між швидкостями відносними течії та швидкостями лінійних деформацій:

$$\begin{cases} \xi_r=\dfrac{\partial \upsilon_r}{\partial r}; \\ \xi_\theta=\dfrac{1}{r\sin(\varphi)}\dfrac{\partial \upsilon_\theta}{\partial \theta}+\dfrac{\upsilon_\varphi ctg\left(\varphi\right)}{r}+\dfrac{\upsilon_r}{r}; \\ \xi_\varphi=\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon_\varphi}{\partial \varphi}+\dfrac{\upsilon_r}{r}. \end{cases} \quad (4.8)$$

Рівняння зв'язку між швидкостями відносними течії і швидкостями кутових деформацій:

$$\begin{cases} \eta_{r\theta}=\dfrac{1}{r\sin(\varphi)}\dfrac{\partial \upsilon_r}{\partial \theta}+\dfrac{\partial \upsilon_\theta}{\partial r}-\dfrac{\upsilon_\theta}{r}; \\ \eta_{\theta\varphi}=\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon_{\theta r}}{\partial \varphi}-\dfrac{\upsilon_\theta ctg\left(\varphi\right)}{r}+\dfrac{1}{r\sin(\varphi)}\dfrac{\partial \upsilon_\varphi}{\partial \theta}; \\ \eta_{\varphi r}=\dfrac{\partial \upsilon_\varphi}{\partial r}-\dfrac{\upsilon_\varphi}{r}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon_r}{\partial \varphi}. \end{cases} \quad (4.9)$$

Оскільки щільність сировини спресованої не змінюється, то умова об’єму (умова стискання), має виконуватися:

$$\xi_r + \xi_\theta + \xi_\varphi = 0. \tag{4.10}$$

Робимо припущення, що через конічний канал рух сировини відбувається у напрямку радіус-вектора конічного каналу та переміщення у напрямках, нормальних до нього відсутні. У цьому випадку можна записати, що швидкості переміщень вздовж осей θ і φ, а також часткові похідні по ним дорівнюють нулю, тобто:

$$\upsilon_\theta = 0; \upsilon_\varphi = 0; \frac{\partial}{\partial\theta} = 0; \frac{\partial}{\partial\varphi} = 0. \tag{4.11}$$

З урахуванням цього системи (4.7), (4.8) та (4.9) набувають вигляду рівнянь:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\sigma_r}{\partial r} + \dfrac{1}{r}\left[2\sigma_r - \left(\sigma_\theta + \sigma_\varphi\right) + \tau_{r\varphi} ctg(\varphi)\right] = 0; \\ \dfrac{\partial\tau_{\theta r}}{\partial r} + \dfrac{1}{r}\left[3\tau_{\theta r} + 2\tau_{\theta\varphi} ctg(\varphi)\right] = 0; \\ \dfrac{\partial\tau_{\varphi r}}{\partial r} + \dfrac{1}{r}\left[3\tau_{\varphi r} - \left(\sigma_\theta - \sigma_\varphi\right) ctg(\varphi)\right] = 0. \end{cases} \tag{4.12}$$

$$\begin{cases} \xi_r = \dfrac{\partial\upsilon_r}{\partial r}; \\ \xi_\theta = \dfrac{\upsilon_r}{r}; \\ \xi_\varphi = \dfrac{\upsilon_r}{r}. \end{cases} \tag{4.13}$$

$$\begin{cases} \eta_{r\theta} = 0; \\ \eta_{\theta\varphi} = 0; \\ \eta_{\varphi r} = 0. \end{cases} \tag{4.14}$$

Припустимо, що швидкість стиснутої, дрібнодисперсної сировини в конічному каналі, через кожну точку на поверхні сферичного сегмента з кутом вершини θ2 та радіусом r, дорівнює v_r(r_i). Рівняння потоку сировини в радіальному напрямку конічного каналу визначається з умови постійної об'ємної швидкості потоку через будь-яку поверхню сферичного сегмента з кутом вершини θ2 в межах радіуса від R₁ до R₂.

Нехай радіальна швидкість сировини на вході в конічний канал буде v₁ для r = R₁ та v_r для радіуса. Площа поверхні сферичного сегмента з кутом вершини θ2 та радіусом r дорівнює:

$$S(r) = \pi r^2 \left(2 + \sin^2 \gamma - 2\cos\gamma \right) \tag{4.15}$$

Потік нерозривності

$$q = \upsilon_1 S_1 = \upsilon_1 \pi r^2 \left(2 + \sin^2 \gamma - 2\cos\gamma \right) = const. \tag{4.16}$$

Виберемо час dt. Потік сировини через поверхню кульового сегмента радіуса r складе:

$$Q = \upsilon_r \pi r^2 \left(2 + \sin^2 \gamma - 2\cos\gamma \right) dt, \tag{4.17}$$

а через вихідний каналу конічного перерізу:

$$Q = \upsilon_1 \pi R_1^2 \left(2 + \sin^2 \gamma - 2\cos\gamma \right) dt \tag{4.18}$$

і рівняння сталості потоку набирає вигляду:

$$\upsilon_r \pi r^2 \left(2 + \sin^2 \gamma - 2\cos\gamma \right) dt = \upsilon_1 \pi R_1^2 \left(2 + \sin^2 \gamma - 2\cos\gamma \right) dt. \tag{4.19}$$

Розв'язуючи рівняння щодо υ_r, отримаємо:

$$\upsilon_r = -\upsilon_1 \frac{R_1^2}{r^2}. \tag{4.20}$$

Після рівняння (4.20) та підстановки у систему рівнянь (4.13) а також перетворень отримаємо для швидкостей відносних лінійних деформацій вирази:

$$\begin{cases} \xi_r = 2\upsilon_1 \dfrac{R_1^2}{r^3}; \\ \xi_\theta = -\upsilon_1 \dfrac{R_1^2}{r^3}; \\ \xi_\varphi = -\upsilon_1 \dfrac{R_1^2}{r^3}. \end{cases} \tag{4.21}$$

Підстановка значень знайдених швидкостей лінійних відносних деформацій d рівняння (4.10) дає:

$$\xi_r + \xi_\theta + \xi_\varphi = 2\upsilon_1 \frac{R_1^2}{r^3} - \upsilon_1 \frac{R_1^2}{r^3} - \upsilon_1 \frac{R_1^2}{r^3} = 0.$$

Умова наразі виконана.

Застосовані до об'єму стиснутої сировини, що спостерігається в конічному каналі, зовнішні сили, з одного боку, виконують роботу виштовхування А. З іншого боку, вони виконують роботу пластичної деформації сировини до циліндричної форми.

Виберіть сферичний елемент з кутом вершини 2γ та товщиною dr. Об'єм вибраного елемента дорівнює:

$$dV = \pi r^2 \left(2 + \sin^2 \gamma - 2\cos\gamma \right) dr. \qquad (4.22)$$

Визначається потужність пластичної деформації за залежністю [56]:

$$dN_{пл} = \sigma_\tau \xi_i dV, \qquad (4.23)$$

де σ_τ – середнє значення напруги за об’ємом течії спресованої сировини; ξ_i - інтенсивність швидкостей відносних деформації.

Інтенсивність швидкостей відносних деформації нескінечно малого об’єму може бути визначена за залежністю [17]:

$$\xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left(\xi_r - \xi_\theta\right)^2 + \left(\xi_\theta - \xi_\varphi\right)^2 + \left(\xi_\varphi - \xi_r\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\eta_{r\theta}^2 + \eta_{\theta\varphi}^2 + \eta_{\varphi r}^2\right)}. \qquad (4.24)$$

З огляду на те, що швидкості кутових відносних деформацій згідно з (4.14) дорівнюють нулю, тобто $\eta_{r\theta} = 0, \eta_{\theta\varphi} = 0$ і $\eta_{\varphi r} = 0$, то після підстановки в рівняння (4.24) вирази для відносних швидкостей лінійних деформацій з (4.21) після перетворень отримаємо:

$$\xi_i = 2\upsilon_1 \frac{R_1^2}{r^3}. \qquad (4.25)$$

Після інтегрування меж рівняння отримаємо інтегрування для визначення потужності, що витрачається на деформацію пластичну в каналі фільєри матриці:

$$N_{пл} = \int_V dN_{пл}, \tag{4.26}$$

або після підстановки в рівняння виразу для роботи елементарної з рівняння (4.23):

$$N_{пл} = \int_V 2\sigma_\tau \upsilon_1 \frac{R_1^2}{r^3} dV = \int_{R_2}^{R_1} 2\sigma_\tau \upsilon_1 \frac{R_1^2}{r} \left[2(1-\cos\gamma) + \sin^2\gamma \right] dr.$$

Для визначення повної роботи пластичної деформації у каналі конічному необхідно взяти інтеграл:

$$N_{пл} = -2\pi\sigma_\tau \upsilon_1 R_1^2 \left[2(1-\cos\gamma) + \sin^2\gamma \right] \ln\frac{R_1}{R_2}. \tag{4.27}$$

4.2.2 Визначення потужності виштовхувальних сил у поперечному перерізі конічного каналу

Потужність є скалярним добутком вектора сили та вектора швидкості, тобто припустимо, що тиск p1 у стиснутій сировині розташований на поверхні S1 сферичного сектора з радіусом R1 на вході в конічний канал і є однаково домінуючим у всіх його точках, тобто p1(R1) = idem. Швидкість сировини в цих точках також дорівнює 1 по всій поверхні, що збігається в напрямку друку 1 та 1 1 . Тиск 2 у стиснутій сировині розташований на поверхні 2 сферичного сектора з радіусом R2 на виході з конічного каналу та вході в циліндричний канал і є однаково домінуючим у всіх його точках, тобто p2 (R2) = idem . Швидкість стиснутої сировини в цих точках також однакова по всій поверхні 2, збі-

гається з напрямком тиску 2 і дорівнює 2. Отже, сила сил тиску в поперечному перерізі конічного вхідного каналу така:

$$N_{вит} = F_1\upsilon_1 = (-p_1)S_1(-\upsilon_1),$$

або

$$N_{вит} = \pi p_1\upsilon_1 R_1^2\left[2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma\right]. \quad (4.28)$$

Потужність тиску сил, спрямованих на проштовхування спресованої маси через канал конічний буде дорівнювати:

$$N_{вих} = F_2\upsilon_2 = p_2S_2(-\upsilon_2) = -\pi p_2\upsilon_2 R_2^2\left[2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma\right]. \quad (4.29)$$

4.2.3 Визначення потужності сил тертя по внутрішній поверхні конічного каналу

Виділимо на бічній поверхні на поточному радіусі r циліндричного каналу елементарну ділянку dS, що дорівнює:

$$dS = 2\pi r dr \quad (4.30)$$

Елементарна сила на елементарній ділянці тертя дорівнюватиме:

$$dF_{тр} = -\tau dS = -\tau 2\pi r dr, \quad (4.31)$$

де $\tau-$ напруження дотичні, що діють на ділянці елементарній dS.

$$\tau = \sigma_\tau \mu_{mp} \nu,$$

де $\mu_{тр}$ - коефіцієнт тертя між сировиною спресованою та матеріалом матриці; ν-коефіцієнт Пуассона.

Потужність тертя сил визначимо, проінтегрувавши тертя сили $dN_{тр}$ по всій поверхні внутрішній конічного каналу від R_2 до R_1:

$$N_{mp} = \int_V \upsilon_r dF_{mp} = \int_{R_2}^{R_1} 2\pi\mu_{mp}\nu\sigma_\tau\upsilon_r r dr, \qquad (4.32)$$

або з урахуванням (4.20):

$$N_{mp} = \int_{R_2}^{R_1} -2\pi\mu_{mp}\nu\sigma_\tau\upsilon_r r dr = -2\pi\mu_{mp}\nu\sigma_\tau\upsilon_1 R_1^2 \ln\frac{R_1}{R_2}. \qquad (4.33)$$

4.2.4 Визначення тиску в конічному каналі

Для визначення тиску на вході в конічний канал в спресованій сировині скористаємось рівнянням балансу потужностей. Для цього найдені значення потужності сили $N_{вит}$ (4.28) та $N_{вих}$ (4.29) підставимо в рівняння (4.6) , потужність деформування пластичного $N_{пл}$ (4.27) та потужність тертя сил об внутрішню поверхню конічного каналу $N_{тр}$:

$$\begin{aligned}&\pi p_1\upsilon_1 R_1^2\left[2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma\right]-2\pi\sigma_\tau\upsilon_1 R_1^2\left[2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma\right]\cdot\ln\frac{R_1}{R_2}-\\&-\pi p_2\upsilon_2 R_2^2\left[2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma\right]-2\pi\mu_{mp}\nu\sigma_\tau\upsilon_1 R_1^2\ln\frac{R_1}{R_2}=0.\end{aligned} \qquad (4.34)$$

Звідси

$$p_1 = p_2 \frac{\upsilon_2 R_2^2}{\upsilon_1 R_1^2} + 2\left(1 + \frac{\mu_{mp}\nu}{2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma}\right)\sigma_\tau \ln\frac{R_1}{R_2}. \quad (4.35)$$

За рівнянням витрат сталості (4.16) маємо $\nu_1 R_1^2 = \nu_2 R_2^2$, тоді

$$p_1 = p_2 + 2\left(1 + \frac{\mu_{mp}\nu}{2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma}\right)\sigma_\tau \ln\frac{R_1}{R_2}. \quad (4.36)$$

При цьому

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{D}{d_0}. \quad (4.37)$$

Підставимо (4.37) у (4.36). Отримаємо рівняння для перепаду розрахунку тиску в каналі матриці:

$$\Delta p_к = p_1 - p_2 = 2\left(1 + \frac{\mu_{mp}\nu}{2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma}\right)\sigma_\tau \ln\frac{D}{d_0}. \quad (4.38)$$

4.3 Визначення тиску в циліндричному каналі матриці

Після виходу з конічної ділянки каналу стиснута маса потрапляє в циліндричну ділянку матричного каналу, яку часто називають калібрувальним каналом. Під час руху через циліндричний канал стиснуті гранули набувають циліндричної форми, тому їх вдавлювання в каналі не призводить до пластичної деформації. Після входу в циліндричний канал гранули знаходяться в пружному стані. Діаметр пружно деформованих гранул дорівнює діаметру циліндрич-

ного каналу (рис. 4.3). Після виходу з матричного каналу діаметр гранул збільшується до Dgr через пружне зміщення вздовж радіуса ur.

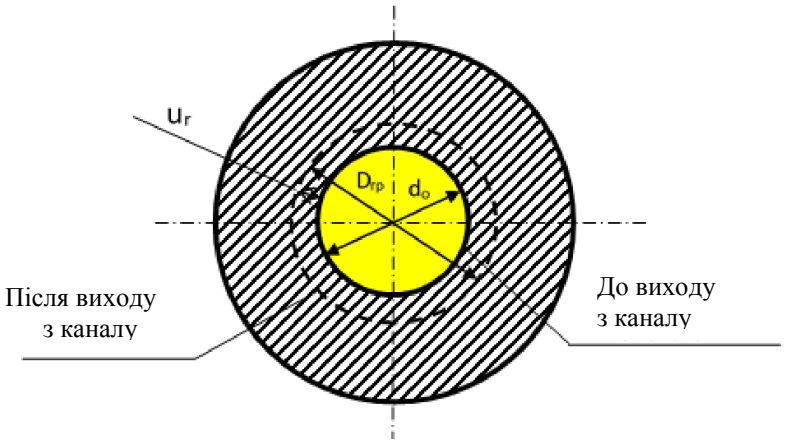


Рисунок 4.3 – Схема пружно-деформованого стану гранули у циліндричному каналі матриці

Оскільки стиснуті гранули в циліндричному каналі є циліндричними, як система розрахунку була обрана полярна система координат r та r. Вісь збігається з центральною віссю циліндричного каналу форми та спрямована в бік виходу з форми.

Важливо зазначити, що після виходу стиснутих гранул з конічного каналу їхня пластична деформація припиняється, і вони зазнають лише пружної деформації під дією зовнішніх сил. На основі цього спостереження основи теорії пружності були використані для подальших математичних досліджень.

Рівняння теорії пружності в полярній системі координат:

Вектор зсуву:

$$\overline{u} = \left(u_r, u_\theta, u_z\right), \tag{4.39}$$

де u_r, u_θ та u_z − проекції точок вектора переміщення на осі r, θ та z.

рівняння рівноваги;

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \Phi_r = 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + \Phi_\theta = 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \Phi_z = 0 \end{cases} \quad (4.40)$$

закон Гука:

- для напружень нормальних:

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_r \\ \sigma_\theta = \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_\theta \\ \sigma_z = \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_z \end{cases} \quad (4.41)$$

- для напружень дотичних:

$$\begin{cases} \tau_{r\theta} = 2\mu\varepsilon_{r\theta} \\ \tau_{rz} = 2\mu\varepsilon_{rz} \\ \tau_{\theta z} = 2\mu\varepsilon_{\theta z} \end{cases}, \quad (4.42)$$

де $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – параметри Пуассона; ν – коефіцієнт Ламе; E - пружності модуля дрібнодисперсної сировини;

рівняння відносних пружних деформацій:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z \quad (4.43)$$

вираження зміщення через деформації:

- для відносних лінійних деформацій:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \dfrac{\partial u_r}{r} \\ \varepsilon_\theta = \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u_\theta}{r} + \dfrac{u_r}{r} \\ \varepsilon_z = \dfrac{\partial u_z}{\partial z} \end{cases} \tag{4.44}$$

- для відносних кутових деформацій:

$$\begin{cases} \varepsilon_{r\theta} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u_r}{\partial \theta} + \dfrac{\partial u_\theta}{\partial r} - \dfrac{u_\tau}{r}\right) \\ \varepsilon_{rz} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_r}{\partial z} + \dfrac{\partial u_z}{\partial r}\right) \\ \varepsilon_{\theta z} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_\theta}{\partial z} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u_z}{\partial \theta}\right) \end{cases} \tag{4.45}$$

Для побудови розрахункової схеми вибираємо нескінченно тонкий переріз гранул, перпендикулярний як до осі x, так і до товщини. У межах цього перерізу вибираємо нескінченно малий сегмент з центральним кутом x. У межах цього сегмента, на відстані r від осі x, визначаємо елемент ширини. Побудуємо рівняння рівноваги для вибраного нескінченно малого елемента.

Розрахункова схема для пружно деформованого стану гранул у циліндричному каналі представлена на рисунку 4.4.

Стиснутий, дрібнодисперсний матеріал безперервно подається через конічний канал до входу циліндричного каналу, а також безперервно екструдується з циліндричного каналу до виходу сопла. У цьому випадку циліндричні гранули можна вважати нескінченно довгими; отже, процеси, що відбуваються з гранулами в циліндричному каналі, є квазістатичними.

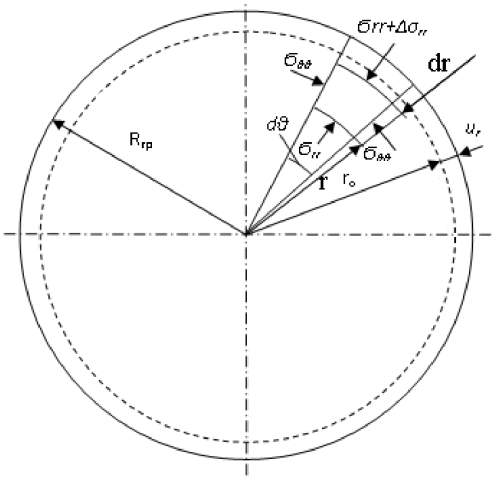


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема пружнодеформованого стану гранули

Гравітаційні сили, що діють на гранули, на кілька порядків менші за сили стиску, що діють на ті ж гранули, і тому ними можна знехтувати. Отже, проекції вектора інерційної сили на осі r, θ та z дорівнюють нулю.

Поперечний переріз гранул є круговим. У цьому випадку, через симетрію, переміщення не залежить від полярного кута. Крім того, тангенціальні переміщення через відсутність пластичної деформації дорівнюють нулю.

Виходячи з цих припущень, основні рівняння теорії пружності будуть такими:

Рівняння рівноваги:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \dfrac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \\ \dfrac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \dfrac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \\ \dfrac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \dfrac{\tau_{rz}}{r} = 0 \end{cases} \qquad (4.46)$$

закон Гука:

- для нормальних напружень:

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_r \\ \sigma_\theta = \lambda\varepsilon + 2\mu\varepsilon_\theta \\ \sigma_z = \lambda\varepsilon \end{cases} \quad (4.47)$$

- для дотичних напружень:

$$\begin{cases} \tau_{r\theta} = 0 \\ \tau_{rz} = 0 \\ \tau_{\theta z} = 0. \end{cases} \quad (4.48)$$

рівняння деформацій:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta. \quad (4.49)$$

вираження відносних деформацій через зміщення:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \dfrac{\partial u_r}{r} \\ \varepsilon_\theta = \dfrac{u_r}{r}. \end{cases} \quad (4.50)$$

Використовуючи для відносних деформацій вираз (4.50) в рівнянні (4.49) і системі рівнянь (4.47), після перетворень одержимо:

$$\begin{cases} \sigma_r = \left(\lambda + 2\mu\right)\dfrac{\partial u_r}{\partial r} + \dfrac{\lambda u_r}{r} \\ \sigma_\theta = \lambda\dfrac{\partial u_r}{\partial r} + \left(\lambda + 2\mu\right)\dfrac{u_r}{r} \end{cases} \quad (4.51)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \tag{4.52}$$

Після рівнянь підстановки для нормальних напруг (4.51) в систему рівноваги рівнянь (4.46) та виконання рівноваги нескладних перетворень отримаємо диференційне рівняння виділеного елемента гранули:

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} = 0 \tag{4.53}$$

Для розв'язання диференціального рівняння (4.53) необхідно встановити граничні умови.

Перша гранична умова полягає в тому, що нормальне напруження на поверхні гранули $r = r0$ всередині циліндричного каналу матриці дорівнює локальному тиску.

Для вибору другої граничної умови припускається, що гранула поза циліндричним каналом матриці має радіус $r = R$gr на своїй циліндричній поверхні з нульовим надлишковим тиском і пружно деформується до радіуса $r0$ після застосування зовнішнього надлишкового тиску.

$$\text{при } r = r_0 = \frac{d_0}{2} \text{ маємо } \sigma_r = -p, \tag{4.54}$$

$$\text{при } r = R_{гр} = \frac{D_{гр}}{2} \text{ маємо } \sigma_r = 0. \tag{4.55}$$

Часткове рішення для рівняння (4.53) має вигляд:

$$u_r = r^n . \tag{4.56}$$

Двічі диференціюючи його, отримаємо:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} = nr^{(n-1)} \tag{4.57}$$

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} = \left(n^2 - n\right) r^{(n-2)} \tag{4.58}$$

Після підстановки рівняння (4.57) і (4.58) в характеристичне рівноваги (4.53) отримаємо наступне рівняння:

$$\left(n^2 - n\right) r^{(n-2)} + \frac{1}{r} nr^{(n-1)} - \frac{r^n}{r^2} = 0,$$

після спрощень маємо:

$$n^2 - 1 = 0. \tag{4.59}$$

Рішенням даного диференціального рівняння є корені n_1=+1 і n_2=−1, а розв'язання характеристичного рівняння рівноваги (4.53) має вигляд:

$$u_r = C_1 r + C_2 r^{-1}, \tag{4.60}$$

де C_1 та C_2 – визначаються з граничних умов.

Диференціюємо рівняння (4.60):

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} = C_1 - \frac{C_2}{r^2}. \tag{4.61}$$

Підставляючи вирази (4.60) і (4.61) в систему рівнянь (4.51), отримаємо після перетворень:

$$\begin{cases} \sigma_r = \left(2\lambda + 2\mu\right) C_1 - 2\mu \dfrac{C_2}{r^2} \\ \sigma_\theta = \left(2\lambda + 2\mu\right) C_1 + 2\mu \dfrac{C_2}{r^2} \end{cases} \tag{4.62}$$

З залежності (4.55) отримаємо:

$$\left(\lambda+\mu\right)C_1-\mu\frac{C_2}{R_{гр}^2}=0.$$

Звідки

$$C_1=\frac{\mu}{\left(\lambda+\mu\right)}\frac{C_2}{R_{гр}^2}. \tag{4.63}$$

Виходячи з умови (4.54) маємо:

$$\left(2\lambda+2\mu\right)C_1-2\mu\frac{C_2}{r_0^2}=-p \tag{4.64}$$

Після перетворень (4.63) та підстановки отримаємо:

$$C_2=\frac{r_0^2R_{гр}^2}{\left(R_{гр}^2-r_0^2\right)}\frac{p}{2\mu} \tag{4.65}$$

Після перетворень (4.65) у (4.63) знайдемо для константи інтегрування $C1$остаточний вираз:

$$C_1=\frac{r_0^2}{\left(R_{гр}^2-r_0^2\right)}\frac{p}{2\left(\lambda+\mu\right)}. \tag{4.66}$$

Знайдені значення C_1 і C_2 підставимо в систему рівнянь (4.62) і отримаємо вирази для визначення радіальних і тангенціальних напружень:

$$\begin{cases} \sigma_r = -p\dfrac{r_0^2}{\left(R_{гр}^2 - r_0^2\right)}\left(\dfrac{R_{гр}^2}{r^2} - 1\right) \\ \sigma_\theta = -p\dfrac{r_0^2}{\left(R_{гр}^2 - r_0^2\right)}\left(\dfrac{R_{гр}^2}{r^2} + 1\right) \end{cases} \tag{4.67}$$

Після підстановки постійних інтегрування C_1 і C_2 у рівняння (4.60) величина переміщення u_r може бути визначена залежністю:

$$u_r = p\frac{rr_0^2}{\left(R_{гр}^2 - r_0^2\right)}\left(\frac{1}{\lambda+\mu} + \frac{1}{\mu}\frac{R_{гр}^2}{r^2}\right). \tag{4.68}$$

Виразивши через модуль пружності E та коефіцієнт Ламе коефіцієнти Пуассона, отримаємо після підстановки в (4.68):

$$u_r = p\frac{(1+\nu)}{E}\frac{rr_0^2}{\left(R_{гр}^2 - r_0^2\right)}\left(1 - 2\nu + \frac{R_{гр}^2}{r^2}\right). \tag{4.69}$$

Перетворимо рівняння (4.69) припустивши, що $r=r_0$:

$$u_r = p\frac{(1+\nu)}{E}\frac{r_0}{\left(\dfrac{R_{гр}^2}{r_0^2} - 1\right)}\left(1 - 2\nu + \frac{R_{гр}^2}{r_0^2}\right). \tag{4.70}$$

Таку ж величину радіального зміщення можна визначити як різницю між радіусом на виході з матриці та радіусом циліндричного каналу матриці. Радіальне зміщення кожної точки на поверхні гранули під час її вдавлювання у матрицю:

$$u_r = R_{гр} - r_0. \tag{4.71}$$

Після підстановки виразів рівняння (4.71) в (4.70) отримаємо для визначення величини бічного тиску спресованої гранули на внутрішню поверхню циліндричного каналу рівняння:

$$p_б = p\frac{E}{1+\nu}\frac{\left(R_{гр}-r_0\right)\left(\frac{R_{гр}^2}{r_0^2}-1\right)}{r_0\left(1-2\nu+\frac{R_{гр}^2}{r_0^2}\right)}. \tag{4.72}$$

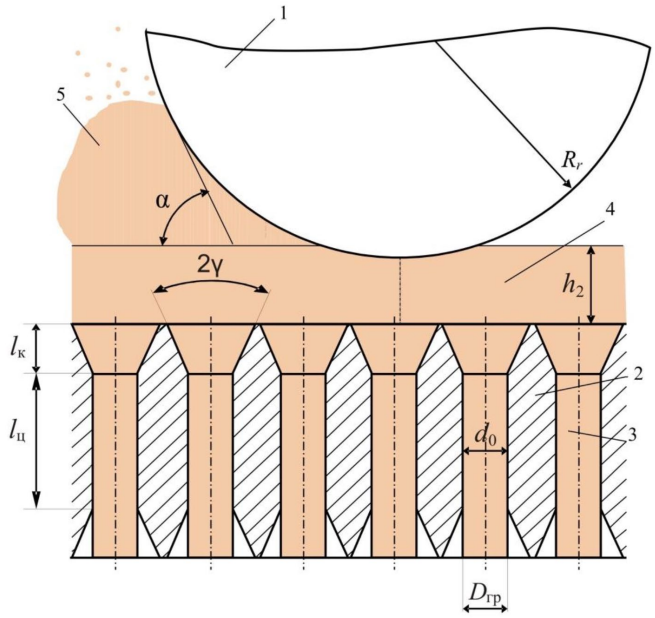
переходячи до діаметрів отримаємо:

$$p_б = p\frac{E}{1+\nu}\frac{\left(D_{гр}-d_0\right)\left(\frac{D_{гр}^2}{d_0^2}-1\right)}{d_0\left(1-2\nu+\frac{D_{гр}^2}{d_0^2}\right)}. \tag{4.73}$$

Силу тертя між гранулою та внутрішньою поверхнею циліндричного каналу матриці знайдемо за рівнянням:

$$F_{тр} = \pi d_0 l_ц \mu_{тр} p_б, \tag{4.74}$$

де ℓц - довжина каналу циліндричного матриці (рисунок 4.5).



1 - пресувальний ролик; 2 – матриця; 3 – спресована гранула; 4 – спресований шар дрібнодисперсної сировини; 5 - насипний шар дрібнодисперсної сировини

Рисунок 4.5 – Розрахункова схема процесу пресування гранули:

Сили що виштовхує гранулу з циліндричного каналу матриці:

$$F_{вит} = \frac{\pi d_0^2}{4} \Delta p_ц. \qquad (4.75)$$

де $\Delta p_ц$ - зміна тиску між отворами вхідним і вихідним циліндричного каналу матриці.

Порівнюючи сили тертя (4.74) та сили виштовхування (4.75), визначимо зміну тиску в каналі циліндричному:

$$\Delta p_ц = 4 \frac{\mu_{тр} l_ц}{d_0} p_б. \qquad (4.76)$$

Після підстановки значення тиску на циліндричну поверхню $p_б$ з (4.73)в цей вираз отримаємо:

$$\Delta p_{ц} = 4\frac{\mu_{тр} l_{ц}}{d_0}\frac{E}{1+\nu}\frac{\left(D_{гр}-d_0\right)\left(\frac{D_{гр}^2}{d_0^2}-1\right)}{d_0\left(1-2\nu+\frac{D_{гр}^2}{d_0^2}\right)}. \quad (4.77)$$

Це рівняння показує, що по довжині циліндричного каналу фільєри перепад тиску прямо пропорційний його довжині.

4.4 Визначення загального тиску пресування

Стиснута гранула на виході з каналу матриці знаходиться під атмосферним тиском, яким можна знехтувати під час визначення тиску пресування. У цьому випадку тиск пресування $p$pr, що розвивається пресувальним роликом, можна визначити за допомогою рівняння:

$$p_{пр} = \Delta p_{вир} + \Delta p_{к} + \Delta p_{ц}. \quad (4.78)$$

Після підстановки виразу для $\Delta p_{вир}$ з (4.4), $\Delta p_{ц}$ з (4.77) и $\Delta p_{к}$ з (4.38) в (4.78) і перетворень одержимо:

$$p_{пр} = \sigma_{\tau} \frac{4h_{пр}}{d_0 + 2l_к tg(\gamma)} + 2\left(1 + \frac{\mu_{тр}\nu}{2(1-\cos\gamma)+\sin^2\gamma}\right)\sigma_{\tau} \ln\frac{D}{d_0} +$$

$$1 - \frac{\left(D_{гр} - d_0\right)\left(\frac{D_{гр}^2}{d_0^2} - 1\right)}{+4\frac{\mu_{тр} l_ц}{d_0}\frac{E}{1+\nu}\, d_0\left(1 - 2\nu + \frac{D_{гр}^2}{d_0^2}\right)} \quad . \qquad (4.79)$$

Отримане співвідношення показує, що тиск, який чинить ролик на гранулу під час пресування в циліндричному каналі, є лінійним. Тиск пресування залежить від параметрів сировини, що пресується, таких як модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та коефіцієнт тертя об внутрішню поверхню циліндричного каналу матриці. Отримане рівняння пов'язує тиск пресування гранул з основними конструктивними характеристиками пресувального обладнання та фізичними характеристиками дрібнодисперсної сировини.

Висновки до четвертого розділу

Основними вимогами до грануляторів є виробництво гранул з необхідною щільністю, міцністю та розміром, при одночасному забезпеченні паспортної продуктивності.

Щільність гранул є функцією тиску пресування дрібнодисперсної сировини через матрицю. На величину тиску пресування впливають конструктивні особливості, такі як радіус пресувального ролика, зазор між циліндричною поверхнею пресувального ролика та матрицею, діаметр та довжина циліндричного каналу матриці, розмір конічного каналу матриці та кут при вершині конуса. Окрім конструктивних особливостей, на тиск пресування також впливають фізичні характеристики сировини, такі як межа текучості, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт тертя пресованої сировини об стінки матриці та відносне розширення гранули після виходу з матриці.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Останнім часом інтерес до виробництва твердого біопалива зріс через нестабільність енергетичного ринку та залежність України від імпорту газу. У цій статті проаналізовано існуючі підходи до отримання та використання паливних пелет, а також проведено огляд та аналіз відповідного обладнання.

Також описано характеристики сировини для виробництва паливних пелет. Запропоновано відповідний технологічний процес, детально описано його етапи.

Розроблено конструкцію вітчизняного гранулятора для виробництва паливних пелет з деревних відходів. Основними елементами запропонованого пристрою є плоска матриця, в якій відбувається безпосередньо гранулювання, та притискні ролики, що забезпечують подання необхідного тиску на сировину. Розроблено електричну схему системи приводу гранулятора.

Встановлено, що щільність пелет є функцією тиску пресування, що прикладається до дрібнодисперсної сировини через матрицю. На величину тиску пресування впливають такі конструктивні особливості, як радіус пресувального ролика, зазор між циліндричною поверхнею пресувального ролика та матрицею, діаметр та довжина циліндричного каналу матриці, розмір конічного каналу матриці та кут на вершині конуса. Окрім конструктивних особливостей, на тиск пресування також впливають фізичні характеристики сировини.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України // Альтернативна енергетика. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://saee.gov.ua/uk/ae/

2. “Про альтернативні джерела енергії”: закон України // Відомості Верховної Ради – України // – 2003. – № 24. – С. 155.

3. Міжнародна енергетична агенція (IEA). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.iea.org/.

4. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.irena.org/.

5. Скиба М. Є. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій переробки відходів натуральних шкір у матеріали та вироби взуттєвого виробництва : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.19.06 «Технологія взуттєвих та шкіряних виробів» / Скиба Микола Єгорович ; Хмельн. держ. ун-т. – К., 2004. – 44 с.

6. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А. Біоенергетика в Україні: стан, перспективи розвитку. — Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2014. — 196 с.

7. Калетнік Г. М. Біопаливо: продовольча, енергетична та екологічна безпека України. — Київ : Хай-Тек Прес, 2010. — 516 с.

8. Thek, G., Obernberger, I. The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets. London: Earthscan, 2012. — 549 p.

9. Garcia-Maraver, A., Perez-Jimenez, J. A. (Eds.) Biomass Pelletization: Standards and Production. London: Springer, 2015. — 305 p.

10. Obernberger, I., Thek, G. Power from Pellets: Technology and Appli?ations. London: Earthscan, 2010. — 240 p.

11. Скиба М.Є. Обладнання для переробки відходів. Навчальний посібник. - Хмельницький.: ХДУ, 2004. - 90 с.

12. Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. Fuel, 2011, Vol. 90(11), pp. 3285–3290.

13. Kaliyan, N., Morey, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and Bioenergy, 2009, Vol. 33(3), pp. 337–359.

14. Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., Kenney, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2011, Vol. 5(6), pp. 683–707.

15. Shaw, M. D. Feedstock and process variables influencing biomass densification. Biomass and Bioenergy, 2008, Vol. 33(1), pp. 1–19.

16. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.

17. Дубровін В. О., Корчемний М. О., Масло І. П. Біоенергетика : навчальний посібник. — Київ : Аграрна наука, 2009. — 276 с.

18. Ковальчук В. П. Дослідження процесу гранулювання рослинної біомаси // Вісник аграрної науки. — 2016. — № 4. — С. 52–58.

19. Лисак О. М., Шпак В. М. Аналіз технологій виробництва твердого біопалива з агробіомаси // Наукові праці НУБіП України. — 2017. — Вип. 265. — С. 143–150.

20. Мельник О. В. Обґрунтування параметрів прес-гранулятора для виробництва паливних пелет : дис. канд. техн. наук : 05.05.11. — Вінниця, 2018. — 184 с.

21. ДСТУ 7124:2009 Паливо тверде біологічне. Терміни та визначення. — Чинний від 2010-01-01.

22. ДСТУ EN ISO 17225-2:2018 Тверді біопалива. Паливні пелети з деревини. Класифікація та технічні вимоги. — Чинний від 2019-01-01.

ДОДАТОК А