

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Кафка Михайло Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Аналіз застосування сучасних вимірювальних технологій для визначення
теплоти згорання паливних гранул з деревини
(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики
(назва освітньої програми)

152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва спеціальності)

М. В. Кафка

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Яворський Андрій Вікторович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

О. Є. Середюк
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень Бакалавр

Спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

інформаційно-вимірювальних
технологій

О. Є. Середюк

“ _____ ” _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Кафці Михайлу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз застосування сучасних вимірювальних технологій для визначення теплоти згорання паливних гранул з деревини

керівник роботи Яворський Андрій Вікторович, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “24” квітня 2024 року № 271/7

2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи Дані теплоти згорання різних видів біопалива, вмісту вологи та зольності, заміри маси взірців сировини паливних гранул

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Розділ 1 Технології виготовлення паливних гранул та технології визначення теплоти згорання. 1.1. Паливні гранули. Класифікація та способи виготовлення. 1.2 етапи та процеси виготовлення паливних гранул. Установки для виготовлення паливних гранул та їх складові елементи. Розділ 2 Технології визначення теплоти згорання паливних гранул. 2.1 визначення теплоти згорання. 2.2 методи визначення теплоти згорання. 2.3 порівняння теплоти згорання паливних гранул з іншими видами біопалива. Розділ 3 Експериментальне дослідження визначення вмісту вологи та зольності. Метод висушування в сушильній шафі. 3.1 метод висушування в сушильній шафі. 3.2 визначення вмісту вологи та зольності. Розділ 4. Експериментальне дослідження теплоти згорання калориметром ІКА С 1. 5.

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А.В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В.Д.</i>		

7. Дата видачі завдання 24.04.2024 р. (відповідно до наказу). Наказ № 271/7 від 24.04.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Технології виготовлення паливних гранул та технології визначення питомої теплоти згорання</i>	<i>24.04.2024-05.05.2024</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Технології визначення питомої теплоти згорання паливних гранул</i>	<i>10.05.2024-20.05.2024</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Експериментальне дослідження визначення вмісту вологи та зольності. Метод висушування в сушильній шафі</i>	<i>22.05.2024-30.05.2024</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Експериментальне дослідження питомої теплоти згорання калориметром ІКА С 1</i>	<i>01.06.2024-10.06.2024</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	<i>11.06.2024-13.06.2024</i>	<i>виконано</i>

Студент _____

(підпис)

Кафка М. В. _____

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Яворський А. В. _____

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота на тему «Аналіз застосування сучасних вимірювальних технологій для визначення теплоти згорання паливних гранул з деревини» містить: 57 сторінок, 38 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел – 18 найменувань.

Об'єктом дослідження є процес виготовлення та перетворення біопалива в енергію на основі спалювання.

Мета роботи полягає у вирішенні науково-практичної задачі у галузі відновлюваної енергетики та енергетичного менеджменту – дослідження та оцінка ефективності сучасних методів і технологій, які використовуються для вимірювання теплоти згорання деревних паливних гранул та оцінювання потенціалу виготовлення паливних гранул з хвойних дерев.

Під час виконання бакалаврської роботи визначено сучасний стан біоенергетики України та напрямки її розвитку, здійснено дослідження енергетичної ефективності пелет.

Проведено експериментальне дослідження визначення питомої теплоти згорання, зольності та вмісту вологи методом висушування в сушильній шафі та експериментальне дослідження питомої теплоти згорання калориметром ІКА С 1.

Отримані результати дослідження на базі експериментальних даних та їх подальшого аналізу дозволили сформулювати таблицю найкращих варіантів сировини для використання у виробництві, що сприятиме підвищенню ефективності виробництва, забезпечать його відповідність сучасним стандартам якості та екологічної безпеки.

ПЕЛЕТИ, ПАЛИВНІ ГРАНУЛИ, ПИТОМА ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ,
ЗОЛЬНІСТЬ, ВМІСТ ВОЛОГИ, ВІДНОВЛЮВАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА

ABSTRACT

The bachelor's work on "Analysis of the use of modern measuring technologies for determining the calorific value of wood pellets" contains: 57 pages, 38 figures, 7 tables, a list of references – 18 titles.

The object of research is the process of manufacturing and converting biofuels into energy based on combustion.

The purpose of the work is to solve a scientific and practical problem in the field of renewable energy and energy management - to study and evaluate the effectiveness of modern methods and technologies used to measure the calorific value of wood pellets and to assess the potential for manufacturing fuel pellets from coniferous trees.

During the bachelor's thesis, the current state of bioenergy in Ukraine and the directions of its development were determined, and the energy efficiency of pellets was studied.

An experimental study was conducted to determine the heat of combustion, ash content and moisture content by drying in a drying oven and an experimental study of the heat of combustion with the ICA C 1 calorimeter.

The results of the study based on the experimental data and their further analysis allowed us to form a table of the best options for raw materials for use in production, which will help to increase production efficiency and ensure its compliance with modern quality and environmental safety standards.

PELLETS, FUEL PELLETS, CALORIFIC VALUE, ASH CONTENT, MOISTURE CONTENT, RENEWABLE ENERGY

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ	9
1.1. Паливні гранули. Класифікація та способи виготовлення.....	10
1.2 Етапи та процеси виготовлення паливних гранул. Установки для виготовлення паливних гранул та їх складові елементи	17
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ	28
2.1 Визначення теплоти згорання	28
2.2 Методи визначення питомої теплоти згорання	29
2.3 Порівняння питомої теплоти згорання паливних гранул з іншими видами біопалива	35
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ВОЛОГИ ТА ЗОЛЬНОСТІ. МЕТОД ВИСУШУВАННЯ В СУШИЛЬНІЙ ШАФІ	38
3.1 Метод висушування в сушильній шафі	38
3.2 Визначення вмісту вологи та зольності	40
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ КАЛОРИМЕТРОМ ІКА С 1	44
4.1 Проведення експериментального дослідження теплоти згорання Калориметром ІКА С 1.....	44
4.2 Вартість проведення вимірювання визначення питомої теплоти згорання однієї паливної гранули.....	50
ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55

ВСТУП

Актуальність роботи

В наш час Україна зіткнулася з умисним руйнуванням енергетичної інфраструктури росією за час повномасштабної війни. Це призвело до аварійного відключення електроенергії по всій країні, перш за все, цільово руйнуються великі джерела енергії та ключові розподільні підстанції, що веде до максимальної шкоди енергетичній системі загалом. У результаті цього виникає гостра проблема нестачі виробленої потужності та навіть неможливості доставки необхідної кількості енергії для всіх споживачів, тому пошук альтернативних шляхів виробництва електричної енергії вельми важливим завданням.

Одним із рішень є використання відновлюваних джерел енергії, а саме біоенергетики. Це особливо актуально, оскільки Україна має великий потенціал в цій сфері відновлювальної енергетики [1, 2 С. 119-128]. Отже, крім вирішення надзвичайно важливої проблеми виготовлення та постачання електричної енергії, можна також зменшити кількість викидів парникових газів та розвинути цю сферу енергетики в Україні.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає у вирішенні науково-практичної задачі в галузі відновлюваної енергетики та енергетичного менеджменту – є дослідження та оцінка ефективності сучасних методів і технологій, які використовуються для вимірювання теплоти згорання деревних паливних гранул та оцінювання потенціалу виготовлення паливних гранул з хвойних дерев.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати основні види паливних гранул, їх виготовлення та використання для потреб населення України;
- проаналізувати сучасні технології та методи, які використовуються для вимірювання теплоти згорання біомаси, зокрема паливних гранул з деревини.
- провести експериментальне визначення питомої теплоти згорання паливних гранул і оцінити ефективність проведення процедури вимірювання;

Об'єктом дослідження є процес виготовлення та перетворення біопалива в енергію на основі їх спалювання.

Предметом дослідження є потенціал отримання енергії від спалювання паливних гранул.

Практичне значення одержаних результатів

В результаті виконання бакалаврської роботи проведені експериментальні дослідження визначення питомої теплоти згорання паливних гранул на калориметрі ІКА 1 С, оцінено повністю ефективність процедури проведення вимірювання з точки зору затрати ресурсів та часу. Вагомим практичним результатом виконання бакалаврської роботи є можливість застосування даного підходу оцінювання потенціалу спалювання біопалива. Більшість виробників не проводять дослідження з визначення питомої теплоти згорання і не вказують її в своїх пропозиціях продажу. Визначення питомої теплоти згорання за допомогою сучасних методів дозволяє виробникам оптимізувати процес виготовлення гранул, забезпечуючи високу якість продукції і економію ресурсів.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ

На початку ХХІ століття відновлювальна енергетика стала ключовим напрямком у розвитку сучасних технологій, примножуючи свою вагу і значення у сфері енергетики. Однією з найважливіших галузей відновлювальної енергетики є біоенергетика, яка використовує органічні матеріали, такі як біомаса, для виробництва електричної та теплової енергії.

Один із важливих аспектів біоенергетики – це виготовлення паливних гранул із біомаси. Паливні гранули виготовляються шляхом стиснення сировини, такої як деревина, солома, або інші органічні матеріали, у циліндричні форми. Цей процес дозволяє зберігати та транспортувати енергію з біомаси більш ефективно та зручно.

На даний час у світі кількість споживаної енергії з відновлюваних джерел на основі біопалива складає близько 15% порівняно з іншими видами енергії [3]. В окремих європейських країнах внесок біопалива в загальному споживанні первинних енергоносіїв становить значну частку – в Данії – 8%, Швеції – 19%, Фінляндії – 22%, незважаючи на те, що вони мають значні запаси викопних вуглеводнів. За існуючими оцінками в Україні частка ВДЕ не перевищує 2,7% від обсягів виробленої енергії. В Енергетичній стратегії України до 2030 р передбачається її збільшення до 10 %.

Україна має енергетичний потенціал деревини 2,13 млн. т у.п., з яких 1,48 доцільно використовувати для опалення. Відходи деревини, які оцінюються у розрахунку, є відходами кінцевої вирубки лісу і проріджування. Загальна кількість лісосічних відходів, відходів лісообробної промисловості отримана з статистичних даних. У лісових відвалах накопичилось більш ніж 14 млн. м³ відходів, у лісах – ще 7 млн. м³. При цьому цей процес триває.

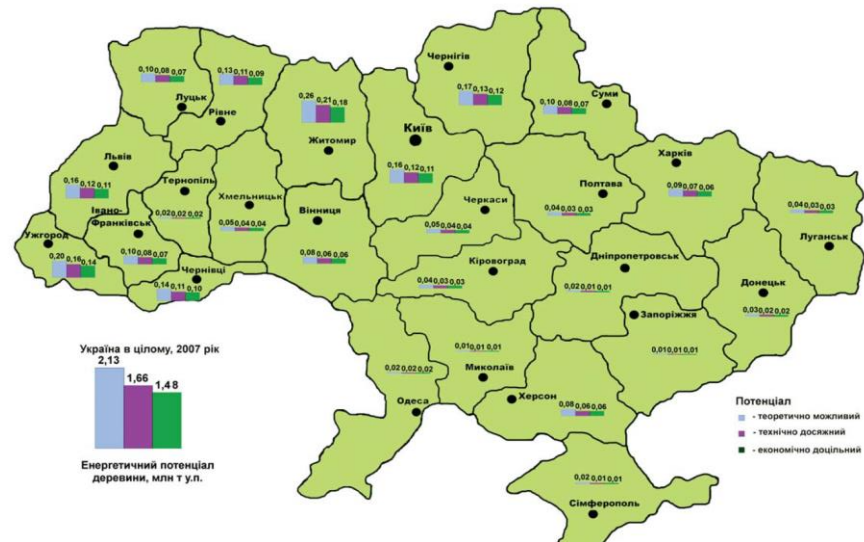


Рис. 1.1 – Енергетичний потенціал деревної біомаси України*

* Джерело: [1].

У регіонах Західної України відходи деревопереробки та заготівлі становлять серйозну соціальну та екологічну проблему.

1.1 Паливні гранули. Класифікація та способи виготовлення

Щоб задовольнити потреби в енергії, все більше компаній, комерційних груп і домогосподарств використовують преси для пелет з біомаси та стають споживачами деревних пелет. Тенденції переходу на пелети набувають популярності, оскільки пелети є більш стійким джерелом енергії, ніж викопні.



Рис. 1.2 – Пелета з біомаси чи вугілля, що краще для палива*

* Джерело: сформовано автором на основі [3].

Паливні гранули мають декілька переваг. Вони екологічно чисті, оскільки паліться природним чином, мають високий коефіцієнт тепловиділення та можуть бути використані для опалення, виробництва електроенергії та тепла. Використання паливних гранул є одним із способів зменшення використання вугілля та інших необережних джерел енергії.

При спалюванні 1 000 кг брикетів виділяється стільки ж теплової енергії, як при спалюванні:

- 1 600 кг деревини,
- 478 куб.м газу,
- 500 л дизельного палива,
- 1 000 кг вугілля,
- 685 л мазуту.

Проведемо класифікація паливних гранул для цілей дослідження.

Паливні гранули поділяють [4]:

- за породами деревини:
 - з деревини хвойних порід;
 - з деревини листяних порід;
 - з деревини хвойних та листяних порід;
- за геометричними
 - прямокутні;
 - багатокутні;
 - з округленими кутами;
 - круглі;
- за технологічними ознаками
 - без зв'язувальної речовини;
 - зі зв'язувальною речовиною;
- за конструкційними ознаками:
 - суцільні;
 - з внутрішніми порожнинами;
 - з порожнинами на поверхні;
 - з внутрішніми та зовнішніми порожнинами.

Розглянемо детально окремо три вида пелет:

1) Пелети з соломи

В основному пелети з соломи експортують до Австрії, Німеччини, Польщі та Чеської Республіки. Невеликі обсяги також реалізують і на вітчизняному ринку. Пелети з соломи мають високий вміст сірки, що інколи заважає їхній конкурентоспроможності у порівнянні з пелетами з деревини та лушпиння соняшнику. Однак, зростання використання соломи призводить до зростання цін на неї, які вже інколи досягають 600 грн за тюк (близько 60 євро). Коли ж солону купують безпосередньо з поля в незатюкованому вигляді, її ціна може бути дуже низькою на рівні 50 грн за тону. Однак витрати на її збір та транспортування можуть бути високими. Витрати на сировину складають 250грн/т. Співвідношення ваги сировини до ваги пелет 1,36т сировина на 1т пелет. Середні ціни на пелети з соломи становлять 100 євро/т.

2) Пелети з лушпиння соняшнику

Пелети з лушпиння соняшнику здебільшого експортують до Польщі та Чехії. Цей вид біопалива особливо дешевий у холодний сезон, коли активно виробляється соняшникова олія (з жовтня по грудень). Влітку багато олієжирових заводів не працюють, що ускладнює постачання сировини. Витрати на лушпиння складають 200 грн/т, а на виробництво 1 тонни пелет потрібно 1,1 тонни сировини. Середня ціна на пелети з лушпиння соняшника становить близько 90 євро/т. [5].

3) Пелети з деревини

Найбільш широко використовуються деревні пелети вони експортуються до Польщі, Італія, Греція, Німеччини, Данії, Великобританії, Чеської Республіки, Латвії, Литви, Франції та Росії. Витрати на сировину складають 50грн/т. Співвідношення ваги сировини до ваги пелет 1,36 сировина на 1т пелет. Середні ціни на пелети з деревини становлять 120 євро/т.

Найпопулярніші види пелет для опалення:

- із сосни – 4,73-4,95 кВт/кг;
- дубові – 5,4 кВт/кг;

- з лушпиння соняшника – 5,1 кВт/кг.

Розміри та допустимі відхили брикетів наведено нижче.

Розміри у міліметрах:

- за довжиною
- від 10 до 400;
- за товщиною і шириною або діаметром – від 25 до 75.

Допустимі відхили розмірів брикетів від номінальних значень дорівнюють ± 5 мм. Фактичні поперечні розміри брикетів не повинні бути менше ніж 25 мм. Радіуси закруглення на ребрах брикетів допускають величиною від 3 мм до 20 мм.

Гранули паливні деревинні.

Розміри у міліметрах:

- за діаметром — від 4 до 24;
- за довжиною — від 3 до 49.

Допустимі відхили довжин і діаметрів гранул від номінальних значень дорівнюють ± 1 мм. У таблиці 1.1 систематизовано технічні вимоги до брикетів та гранул паливних.

Таблиця 1.1 – Технічні вимоги до брикетів та гранул паливних [4]

Ч.ч	Назва показника	Одиниця вимірювання	Нормативи за групами якості			
			I	II	III	IV
1	2	3	4	5	6	7
1	Щільність	кг/м ³	Не менше ніж 1100	Не менше ніж 950	Не менше ніж 800	Не менше ніж 650
2	Насипна щільність	кг/м ³	Не менше ніж 600	Не менше ніж 500	Не менше 400	Не нормують
3	Вміст дрібних частинок розміром менше ніж 15 мм для брикетів і 3 мм для гранул (після виготовлення)	%	Не більше ніж 8	Не більше ніж 12	Не більше ніж 16	Не нормують

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
4	Вологість	%	Не більше ніж 10	Не більше ніж 12	Не більше ніж 14	Не більше ніж 16
5	Зольність	%	Не більше ніж 1,0	Не більше ніж 4,0	Не більше ніж 7,0	Не більше ніж 12,0
6	Найнижча питома теплота згорання робочої маси брикету	МДж/кг	Не менше ніж 17,5	Не менше ніж 16,5	Не менше ніж 15,5	Не менше ніж 14,5
7	Вміст сірки*	%	Не більше ніж 0,08	Визначають вміст окремих хімічних елементів або всіх, що вказані в цій таблиці, за домовленістю між виробником і споживачем	Не нормують	
8	Вміст азоту*	%	Не більше ніж 0,3			
9	Вміст хлору	%	Не більше ніж 0,02			
10	Вміст арсеніуму	мг/кг	Не більше ніж 0,8			
11	Вміст кадмію	мг/кг	Не більше ніж 0,5			
12	Вміст хрому	мг/кг	Не більше ніж 8			
13	Вміст міді	мг/кг	Не більше ніж 5			
14	Вміст ртуті	мг/кг	Не більше ніж 0,05			
15	Вміст цинку	мг/кг	Не більше ніж 100			
16	Вміст свинцю	мг/кг	Менше ніж 10			
17	Вміст домішок**	%	Не більше ніж 2 %		Не більше ніж 10 %	

* Сірку і азот нормують тільки для брикетів, які виготовлено з подрібненої деревини, що оброблена хімічними добавками

** Домішки – частинки ґрунту, що потрапляють у брикети разом із корою

Таблиця 1.2 – Світовий стандарт якості пелет ISO 17225 [18]

Норми якості	DIN plus	EN plus- A1	EN plus- A2	EN-B
Діаметр, мм	4 - 10	6 або 8	6 або 8	6 або 8
Довжина, мм	$\leq 5 \times D$	$3,15 \leq L \leq 40$	$3,15 \leq L \leq 40$	$3,15 \leq L \leq 40$
Насипна маса, (кг/м ³)	-	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Теплота згорання, (МДж/кг)	≥ 18	$\geq 16,5$	$\geq 16,3$	$\geq 16,0$
Вологість (%)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Дрібна фракція/Пил (%)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Механічна стійкість (%)	$\geq 97,7$	$\geq 97,5$	$\geq 97,5$	$\geq 96,5$
Зольність(%)	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	$\leq 3,0$
Показник плавління золи, ($\geq C$)	-	≥ 1200	≥ 1100	≥ 1100

Біоенергетика та виготовлення паливних гранул мають значний потенціал як для розвитку енергетики, так і для зменшення вуглецевого сліду в енергетичній галузі, що робить їх ключовими елементами відновлювального енергетичного сектору.

Дослідимо технологію виготовлення паливних гранул (пелет).

Сировиною для виробництва пелет є майже всі відходи деревообробки та сільського господарства. Для виготовлення твердого біопалива підійде тирса, солома, насіння, відходи соняшника, інших культур, костра та ін.

Гранули виготовляється методом екструдерного пресування при високих температурах, зв'язуючою речовиною є лігнін – натуральний продукт, що виділяється при нагріванні (рис. 1.2), такий вид палива не містить ніяких додаткових хімічних добавок [6].



Рис. 1.3 – Наочне зображення виготовлення паливних гранул*

* Джерело: [6].

Сама технологія виготовлення не відрізняється в залежності від типів сировини – є однаковою як для соломи, так і для тирси різних порід. Брикетуванню підлягає вся сировина, рівень вологи якої не більший 12% (це важливо).

Переваги використання паливних гранул:

- Екологічна стійкість: Використання паливних гранул з відновлюваних джерел, таких як деревина, біомаса тощо, сприяє зменшенню викидів CO₂ та інших шкідливих речовин у порівнянні з традиційними видами палива.

- Енергетична ефективність: Паливні гранули мають високу теплову ефективність, що дозволяє отримати більше енергії при їх згорянні порівняно з деякими іншими видами палива.

– Використання відходів: Гранули часто виготовляються з вторинної сировини, такої як деревина з лісозаготівельних відходів або агро-біомаса, що сприяє використанню відходів та зменшенню викидів.

– Універсальність застосування: Паливні гранули можна використовувати у багатьох сферах: від обігріву приватних будинків до виробництва енергії на комерційних електростанціях.

– Зручність зберігання та транспортування: Гранули мають компактну форму, що робить їх легкими для зберігання та перевезення, особливо у порівнянні з іншими видами палива.

Недоліки використання паливних гранул:

– Висока вартість виробництва: Виробництво паливних гранул може бути дорогим, особливо в умовах низької доступності вихідної сировини.

– Вплив на ціни на продукцію: Збільшення попиту на паливні гранули може призвести до зростання цін на деякі види сировини, такі як деревина.

– Потреба у великих кількостях сировини: Для виробництва значної кількості паливних гранул може бути потрібно велике обсяги сировини, що може призвести до проблем з постачанням.

– Негативний вплив на здоров'я: При неправильному зберіганні та обробці сировини для гранул, може виникати пил, що може бути шкідливим для здоров'я.

– Необхідність спеціального обладнання: Для використання паливних гранул іноді потрібне спеціалізоване обладнання, що може вимагати додаткових витрат на впровадження нової технології.

Застосування в пелетних печах/котлах.

Пелетні печі – це пристрої, які використовують в якості палива – паливні гранули. Умови при спалюванні пелет набагато стабільніші, ніж при спалюванні дров, через однорідність пелет [7]. Тому такі котли працюють більш ефективно і мають менший рівень викидів у порівнянні зі звичайними котлами, що працюють на дровах або тирсі. Ще однією великою перевагою пелетних печей є можливість автоматизованої подачі палива. Інтегровані бункери для зберігання гранул

дозволяють працювати в автоматичному режимі протягом декількох днів. Пелети, наприклад, транспортуються паливним шнеком в камеру згоряння і, як правило, автоматично запалюються за допомогою свічки розжарювання. Тому пелетні агрегати потребують електроенергії під час роботи (рис. 1.4).

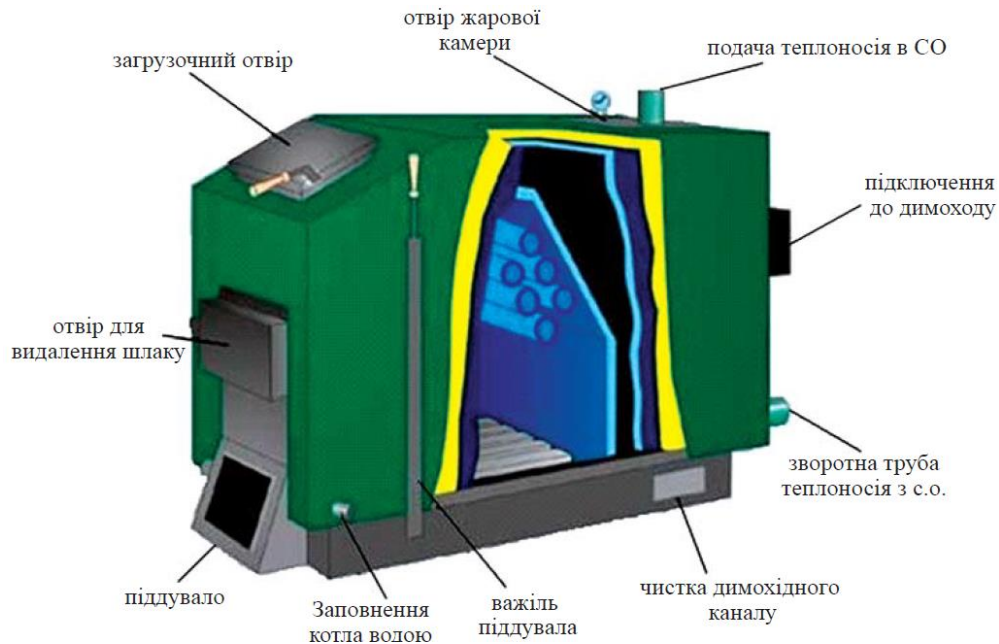


Рис. 1.4 – Сучасний котел для спалювання біопалива деревинного походження*

* Джерело: [7].

Пелетні печі та котли можуть бути оснащені інтелектуальними технологіями, такими як датчики димових газів, для підвищення їх продуктивності. На сьогоднішній день пелетні котли є найсучаснішим рішенням для спалювання біомаси.

1.2 Етапи та процеси виготовлення паливних гранул. Установки для виготовлення паливних гранул та їх складові елементи.

Паливні гранули є ефективним і екологічно чистим джерелом енергії, виготовленим із відновлюваних біоматеріалів, таких як деревина, сільськогосподарські відходи, солома та інші органічні матеріали. Процес виробництва пелет передбачає кілька етапів, кожен з яких має вирішальне значення для забезпечення високої якості кінцевого продукту. У цьому розділі ми детально розглянемо основні етапи виготовлення паливних гранул,

обладнання, що використовується на кожному етапі, та основні компоненти установок для виробництва брикетів.

Етапи виготовлення паливних гранул:

1) Підготовка сировини

Підготовка сировини є першим і дуже важливим етапом у виробництві пелет. Сировина може включати різні біоматеріали, такі як деревина, тріска, тирса, солома або аграрні відходи.

Основні процеси підготовки сировини:

- Сорткування і очищення: Сировина сортується за розміром і очищується від домішок, таких як каміння або метали, які можуть пошкодити обладнання.
- Подрібнення: Цей процес направлений на зменшення фракції вихідної сировини, з метою «полегшення» роботи прес-гранулятора. Спочатку крупні кускові відходи деревини подрібнюються до розміру тирси у валкових машинах. Тирса, як правило, подається в молоткову дробарку і вже залежно від діаметру отворів сит набуває остаточного розміру [8].

Обладнання для підготовки сировини:

- Дробарки: Подрібнюють великі шматки деревини або інших матеріалів до менших часток.
- Сортувальні машини: Видаляють небажані домішки і забезпечують однорідний розмір часток.

2) Сушіння

Після подрібнення сировину потрібно висушити до необхідного рівня вологості, оскільки надмірна вологість може впливати на якість пелет і процес гранулювання. Вологості деревинної сировини потрібно зменшити з природної вологості (40-60% відн.) до вологості, необхідної для гранулювання (8-14% відн.) [9].

Обладнання для сушіння:

- Барабанні сушарки: Видаляють вологу з великих обсягів сировини за рахунок обертання і подачі гарячого повітря.

- Лінійні сушарки: Використовуються для рівномірного сушіння сировини на конвеєрній стрічці.

3) Гранулювання

Процес гранулювання є ключовим етапом, на якому суха тирса в спеціальних прес-грануляторах перетворюється на гранули діаметром 6 або 8 мм. Формування пелет відбувається, коли сировина потрапляє між обертовою матрицею та роликками. Під час цього процесу маса деревини нагрівається до температури понад 110 °С, що призводить до плавлення лігніну – природного компонента деревини, який виступає як сполучна речовина, скріплюючи гранули між собою.

Процес гранулювання включає:

- Пресування: Сировина проходить через прес-форми або матриці, де під високим тиском і температурою вона стискається і формується в гранули.
- Охолодження: Готові гранули охолоджуються для стабілізації і зменшення ламкості.

Обладнання для гранулювання:

- Гранулятори (преси): Стискають сировину через матриці для формування гранул.
- Охолоджувачі: Знижують температуру гранул після пресування, забезпечуючи їхню міцність і стабільність.

4) Сортування і пакування

Після охолодження паливних гранул сортуються за розміром і якістю, а потім упаковуються для зберігання і транспортування. Гранули фасуються у великі мішки – «біг-беги» 620-1 000 кг, маленькі поліетиленові пакети 15-25 кг і насипом в різні контейнери (10-20 т) [9].

Сортування і пакування включає:

- Сортування: Пелети проходять через сита, де видаляються неповноцінні або зламані частини.
- Упаковка: Готові пелети пакуються в мішки або контейнери для зручності зберігання і транспортування.

Обладнання для сортування і пакування:

- Сортувальні машини: Автоматично сортують пелети за розміром і якістю.
- Пакувальні машини: Пакують гранули в мішки або контейнери.



Рис. 1.5 – Фасовка 10-25 Кг*

* Джерело: сформовано автором.



Рис. 1.6 – BigBag 900-1200 Кг*

* Джерело: сформовано автором.

Сучасні установки для виробництва паливних гранул є комплексними системами, які об'єднують різні види обладнання для забезпечення повного циклу виробництва. Для ефективного виробництва паливних гранул необхідно забезпечити скоординовану роботу всіх елементів установки. Технологічна лінія складається з взаємопов'язаних модулів, які забезпечують послідовне виконання кожного етапу виробництва (рис. 1.7 та рис. 1.8).

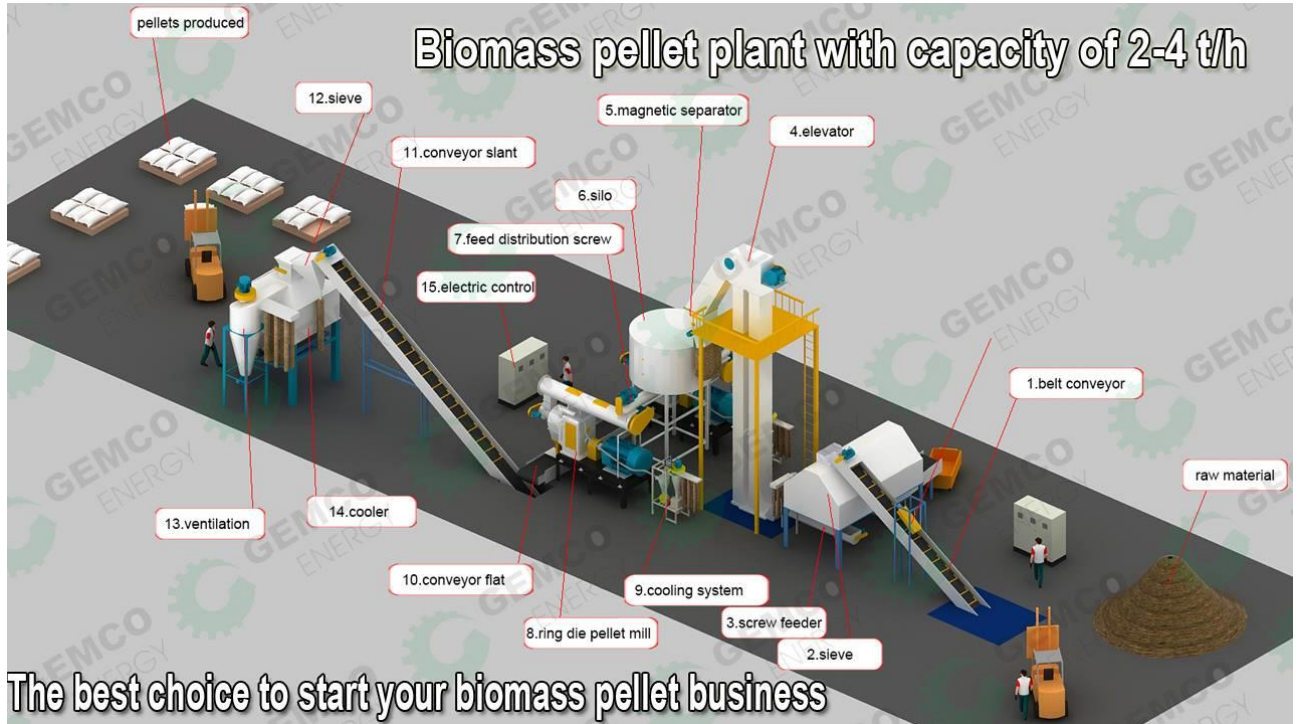


Рис. 1.7 – Процес виробництва пелет 2-4 тонни*

* Джерело: [6].

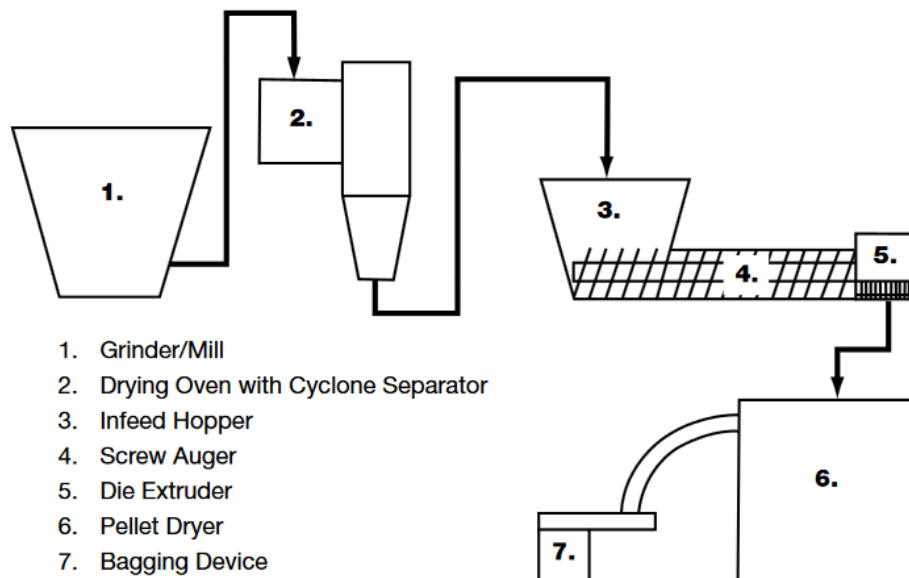


Рис. 1.8 – Схема виробництва паливних гранул*

* Джерело: [6].

Основні елементи установок для виготовлення паливних гранул:

1. Дробарка

Функція: Подрібнює великі шматки сировини до дрібних часток, що підходять для сушіння і гранулювання.



Рис. 1.9 – Щеподробарка DP 660 T ОЛНОВА*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].



Рис. 1.10 – Дробарка тирси ОЛНОВА*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].

2. Сушарка

- Функція: Видаляє зайву вологу з сировини, забезпечуючи оптимальні умови для гранулювання.
- Типи: Барабанні сушарки, стрічкові сушарки, тунельні сушарки.



Рис. 1.11 – Шнек подачі тирси в сушку*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].



Рис. 1.12 – Піч*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].



Рис. 1.13 – Вогнегасник та бункер тирси*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].

3. Гранулятор

- Функція: Стискає сировину через матрицю, формуючи пелети.
- Типи: Кільцеві гранулятори, плоско-матрицеві гранулятори.



Рис. 1.14 – Циклони охолодження*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].



Рис. 1.15 – Прес-гранулятор*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].



Рис. 1.16 – Матриця*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].

4. Охолоджувач

- Функція: Знижує температуру гранул після пресування, стабілізуючи їх структуру і забезпечуючи збереження форми.
- Типи: Водяні охолоджувачі, повітряні охолоджувачі.



Рис. 1.17 – Колона охолодження, сортування та пакування*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].

5. Сортувальна машина

- Функція: Сортує пелети за розміром і якістю, видаляючи дефектні або зламані гранули.

- Типи: Вібраційні сита, барабанні сортувальники.

6. Пакувальна машина

- Функція: Автоматично пакує пелети в мішки або контейнери для зберігання і транспортування.

- Типи: Автоматичні пакувальні машини, ручні пакувальні системи.



Рис. 1.18 – Колона охолодження, сортування та пакування*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].



Рис. 1.19 – Слад паливних гранул*

* Джерело: сформовано автором на основі [6].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ

2.1 Визначення питомої теплоти згорання

Питома теплота згорання паливних гранул є важливим параметром, що визначає їх енергетичну цінність та ефективність використання в енергетичних системах. Паливні гранули з деревини стають все більш популярними через свою екологічність, зручність використання та високу теплотворну здатність. Цей розділ досліджує методи визначення теплоти згорання паливних гранул, фактори, що впливають на цей показник, та порівняння з іншими видами біопалива.

Питома теплота згорання (калорійність) палива – це кількість теплової енергії, що виділяється під час повного згорання одиниці маси палива в атмосфері кисню. Основними видами теплоти згорання є:

- Вища теплота згорання (Q_v): теплота, що виділяється при повному окисленні горючих складових палива, і теплота, що виділяється при конденсації водяної пари, що міститься в продуктах згорання палива [10]. Цей показник відображає максимальну кількість енергії, яку можна отримати від палива.
- Нижча теплота згорання (Q_n): виключає тепло конденсації водяної пари. Використовується для практичних розрахунків, оскільки не враховує енергію, що втрачається при випаровуванні води.

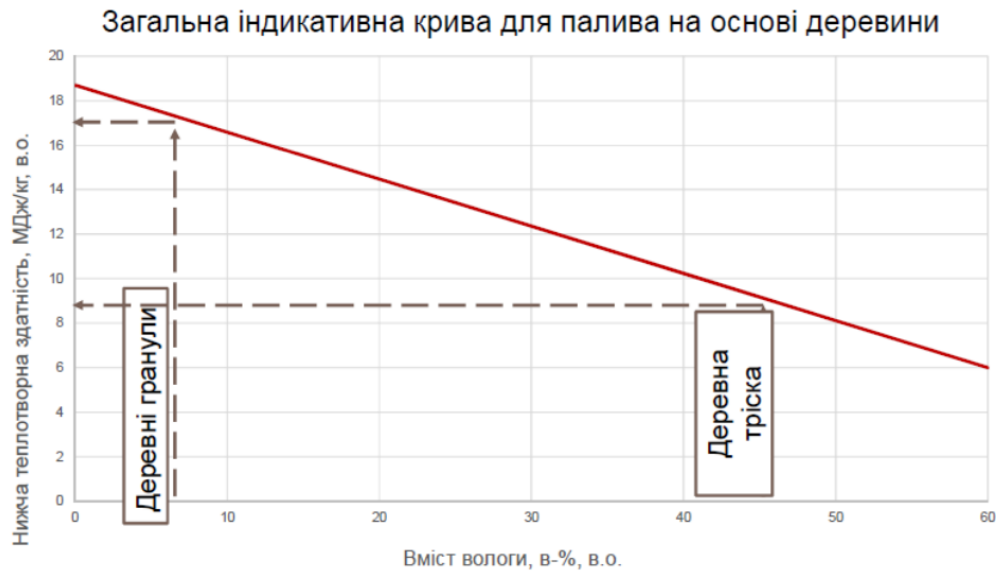


Рис. 2.1 – Співвідношення нижньої теплотворної здатності до вмісту вологи*

* Джерело: [1].

Приклад того самого походження, але іншого типу (і різного вмісту вологи) біопалива:

Деревна тріска: типова вологість $\sim 45\%$. За такої вологості нижча теплотворна здатність становить ~ 9 МДж/кг або $\sim 2,5$ МВт-год/т;

Деревні гранули: типова вологість $\sim 8\%$. За такої вологості нижча теплотворна здатність становить - 17 МДж/кг або $\sim 4,7$ МВт-год/т.

2.2 Методи визначення питомої теплоти згорання

1. Калориметричний метод:

Метод ґрунтується на перетворенні електромагнітної енергії на теплову і визначенні змін параметрів якого-небудь нагрітого тіла (температура, видовження, електричний опір, кількість речовини, що змінила агрегатний стан і т. ін.) [11].

Вимірювання проводяться у калориметрі – спеціальному приладі, в якому зразок палива згорає в атмосфері кисню. Підвищення температури води, що оточує калориметр, використовується для розрахунку теплоти згорання. Процедура включає точне зважування зразка, його спалювання та вимірювання температурних змін.



Рис. 2.2 – Калориметр ІКА С 200*

* Джерело: [11].

2. Бомбовий калориметр:

Один з найбільш точних методів, де зразок палива згорає у закритій камері (бомбі) в кисневій атмосфері. Камера занурена у воду, і тепло, що виділяється при згоранні, передається цій воді. Температурне підвищення води використовується для розрахунку теплоти згорання. Цей метод враховує всі можливі теплові втрати та забезпечує високу точність вимірювань.

Бомбовий калориметр — це традиційний інструмент для вимірювання теплоти згорання, який широко використовується в лабораторних умовах. Принцип роботи цього приладу базується на вимірюванні кількості тепла, яке виділяється під час повного згорання зразка палива в закритій камері при високому тиску кисню.

Автоматичний ізопериметричний калориметр SDAC6000 з кисневою бомбою призначений для визначення теплотворної здатності твердих і рідких паливних речовин, як-от вугілля, кокс, нафтопродукти, цементне чорне борошно, біопаливо і будівельні матеріали. Повністю автоматичний запуск і випуск кисню, повністю автоматичне підймання й опускання бомби, автоматичне оброблення результатів [12].



Рис.2.3 – Автоматичний бомбовий калориметр SDAC6000*

* Джерело: [12].



Рис. 2.4 – Поперечний переріз калориметра SDAC6000*

* Джерело: [12].

Процедура використання бомбового калориметра включає такі етапи:

- 1) Підготовка зразка: Зразок палива точно зважується і поміщається в герметичну камеру (бомбу).
- 2) Запалювання: Зразок підпалюється електричним імпульсом, що викликає його повне згорання.

3) Вимірювання температури: Згорання виділяє тепло, яке передається в воду, що оточує камеру. Зміна температури води реєструється і використовується для розрахунку теплоти згорання.

Переваги:

- Висока точність вимірювань.
- Стабільність результатів при дотриманні стандартних умов проведення експерименту.

Недоліки:

- Тривалість процесу підготовки та проведення вимірювань.
- Високі вимоги до безпеки через використання високого тиску кисню.

3. Метод термогравіметричного аналізу (ТГА):

Використовується для дослідження поведінки палива при нагріванні. Зразок палива нагрівається у спеціальному приладі, і зміни його маси вимірюються у функції температури. Цей метод дозволяє визначити кінетичні параметри процесу згорання та розрахувати теплоту згорання на основі отриманих даних. Типова апаратура складається з аналітичних ваг, програмувальної печі, що нагрівається від електрики, і записуюче обладнання [13].



Рис. 2.5 – Термогравіметричний аналізатор*

* Джерело: [13].

4. Інфрачервоні сенсори

Інфрачервоні сенсори використовуються для визначення теплоти згорання шляхом аналізу інфрачервоного випромінювання, яке виділяється під час згорання. Цей метод дозволяє проводити безконтактні вимірювання в реальному часі.

Основні переваги інфрачервоних сенсорів:

- Безперервний моніторинг: Можливість постійного контролю процесу згорання.
- Швидка реакція: Миттєва реакція на зміни температури.
- Зручність використання: Легке встановлення і відсутність необхідності в підготовці зразків.

Основні недоліки:

- Можливість меншої точності для складних зразків.
- Потреба в калібруванні для різних типів палива.

Процедура використання:

- 1) Встановлення сенсорів: Сенсори розташовуються таким чином, щоб безпосередньо контролювати зону згорання.
- 2) Моніторинг: Сенсори реєструють інфрачервоне випромінювання, яке корелює з температурою згорання.
- 3) Аналіз даних: Дані обробляються для отримання значень теплоти згорання.

5. Пірометрія на основі ПТК

Піроелектричні теплові калібратори (ПТК) використовують пірометричний ефект для точного вимірювання теплових характеристик зразків палива. Цей метод є високоточним і швидким, що робить його підходящим для аналізу нових видів біопалива.

Переваги:

- Висока точність вимірювань.
- Швидке проведення аналізу.

- Універсальність застосування для різних видів палива.

Недоліки:

- Потреба в специфічному обладнанні.
- Можливість складності у калібруванні для нестандартних зразків.

Порівняння методів

Вибір методу для визначення теплоти згорання залежить від багатьох факторів, включаючи точність, швидкість, вартість та умови проведення досліджень.

- Бомбовий калориметр: Найбільш підходить для лабораторних досліджень, де необхідна висока точність і стабільність результатів.
- Калориметр: Ідеальний для автоматизованих лабораторій і промислових підприємств, де важливі швидкість і ефективність.
- Інфрачервоні сенсори: Корисні для безперервного моніторингу і швидких вимірювань у промислових умовах.
- Пірометрія на основі ПТК: Відмінно підходить для аналізу нових видів біопалива і високоточного вимірювання.

Питома теплота згорання паливних гранул залежить від ряду факторів:

- Склад деревини: Різні породи деревини мають різні теплотворні властивості. Наприклад, хвойні породи, як правило, мають вищу теплоту згорання порівняно з листяними через більший вміст смол та екстрактивних речовин.
- Вологість: Вологість є критичним фактором, що впливає на теплоту згорання. Висока вологість значно знижує цей показник, оскільки частина тепла витрачається на випаровування води. Оптимальна вологість для паливних гранул становить близько 8-12%.
- Щільність гранул: Щільніші гранули мають вищу теплоту згорання, оскільки вони містять більше маси палива в одному об'ємі. Це забезпечує більш ефективне згорання та виділення тепла.

- Додатки та домішки: Наявність додаткових компонентів, таких як клеї, домішки або інші добавки, може впливати на теплоту згорання. Наприклад, домішки мінеральних речовин можуть знижувати цей показник.

2.3 Порівняння теплоти згорання паливних гранул з іншими видами біопалива

Паливні гранули мають високу теплоту згорання порівняно з іншими видами біопалива на основі даних таблиці 2.1:

- Деревна тріска: Вища теплота згорання деревної тріски зазвичай нижча і становить близько 10-15 МДж/кг, що значно менше порівняно з паливними гранулами, для яких цей показник становить 18-20 МДж/кг.
- Відходи сільського господарства: Пелети з відходів сільського господарства мають різну теплоту згорання, залежно від вихідного матеріалу. Наприклад, пелети з соломи мають теплоту згорання близько 14-16 МДж/кг.
- Торф: питома теплота згорання торфу варіюється в межах 8-14 МДж/кг, що також менше порівняно з паливними гранулами з деревини.

Паливні гранули з деревини є одним із найефективніших видів біопалива завдяки високій теплотворній здатності та зручності використання. Однак існують і інші види біопалива, такі як деревна тріска, відходи сільського господарства, торф та інші. Цей підрозділ розглядає порівняння теплоти згорання паливних гранул з деревини з іншими видами біопалива, що допомагає оцінити їх ефективність та практичне значення.

Таблиця 2.1 – Порівняння теплоти згорання різних видів біопалива [3].

Вид біопалива	Вища теплота згорання (Q _v), МДж/кг	Нижча теплота згорання (Q _n), МДж/кг
Паливні гранули з деревини	18-20	16-18
Деревна тріска	10-15	9-13
Відходи сільського господарства	12-16	10-14
Торф	8-14	7-12
Пелети з лушпиння соняшника	17-19	15-17

1. Паливні гранули з деревини

Паливні гранули виготовляються з пресованої деревної тирси або стружки. Вони характеризуються високою щільністю, низькою вологістю та однорідною структурою, що забезпечує стабільне та ефективне згорання.

- Вища теплота згорання (Q_v): 18-20 МДж/кг
- Нижча теплота згорання (Q_n): 16-18 МДж/кг

2. Деревна тріска

Деревна тріска – це розпиляна або подрібнена деревина, яка використовується в якості біопалива. Вона має більшу вологість і меншу щільність порівняно з гранулами, що знижує її теплотворну здатність.

- Вища теплота згорання (Q_v): 10-15 МДж/кг
- Нижча теплота згорання (Q_n): 9-13 МДж/кг

3. Відходи сільського господарства

Відходи сільського господарства, такі як солома, кукурудзяні стебла, лушпиння соняшника та інші, також можуть бути використані для виробництва біопалива. Вони мають значну варіацію в теплотворній здатності залежно від типу та складу вихідної сировини.

- Вища теплота згорання (Q_v): 12-16 МДж/кг
- Нижча теплота згорання (Q_n): 10-14 МДж/кг

4. Торф

Торф – це органічне паливо, що утворюється внаслідок природного розкладу рослинних залишків у болотистих умовах. Він має нижчу теплотворну здатність порівняно з деревними гранулами.

- Вища теплота згорання (Q_v): 8-14 МДж/кг
- Нижча теплота згорання (Q_n): 7-12 МДж/кг

5. Пелети з лушпиння соняшника

Лушпиння соняшника є відходом від виробництва олії та може бути використане для виробництва пелет. Вони мають порівняно високу теплотворну здатність завдяки низькій вологості та високому вмісту олійних залишків.

- Вища теплота згорання (Q_v): 17-19 МДж/кг

- Нижча теплота згорання (Q_H): 15-17 МДж/кг

На основі даних можна зробити висновок, що паливні гранули з деревини мають одну з найвищих теплотворних здатностей серед біопалива. Вони поступаються лише пелетам з лушпиння соняшника, але значно перевершують деревну тріску, відходи сільського господарства та торф.

Практичне значення результатів аналізу теплоти згорання полягає в начтупному:

- Оптимізація процесу згорання: Знання про теплоту згорання дозволяє оптимізувати процес згорання для максимального виділення тепла. Це важливо для досягнення високої ефективності опалювальних систем.
- Вибір біопалива: Визначення теплоти згорання допомагає вибрати найбільш ефективні види біопалива для конкретних умов експлуатації, забезпечуючи стабільну роботу опалювальних систем.
- Зниження витрат: Використання паливних гранул з високою теплотворною здатністю дозволяє знижувати витрати на опалення та виробництво електроенергії.
- Енергоефективність: Аналіз теплоти згорання сприяє підвищенню енергоефективності та зменшенню викидів шкідливих речовин в атмосферу.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ВОЛОГИ ТА ЗОЛЬНОСТІ. МЕТОД ВИСУШУВАННЯ В СУШИЛЬНІЙ ШАФІ

3.1 Метод висушування в сушильній шафі

Вологість і зольність паливних гранул є важливими характеристиками, що впливають на їхню теплотворну здатність, ефективність згорання та загальну якість. Високий вміст вологи може знижувати теплоту згорання, тоді як високий вміст золи може спричиняти проблеми під час згорання та збільшувати витрати на очищення обладнання. Тому точне визначення цих параметрів є важливим етапом оцінки якості паливних гранул.

Метод висушування в сушильній шафі є одним із найпоширеніших та найнадійніших способів визначення вмісту вологи в паливних гранулах. Цей метод базується на видаленні вологи з матеріалу шляхом нагрівання при контрольованій температурі до досягнення постійної маси.

Обладнання та матеріали:

Для проведення визначення вмісту вологи та зольності за допомогою методу висушування в сушильній шафі необхідні наступні обладнання та матеріали:

1. Сушильна шафа з регульованою температурою ($105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).
2. Ваги з точністю до 0,01 г.
3. Платинові або кварцові тиглі.
4. Тарілка для зважування, зі скла або матеріалу, який є стійким до температури й корозії з кришкою, яка добре прилягає, і такого розміру, щоб шар проби не перевищував 0,2 г/см
5. Ексикатор.

Сушильна шафа повинна підтримувати стабільну температуру (105 ± 2) °C і в якій атмосфера повітря змінюється від трьох до п'яти разів за годину.,

відповідно до технічних характеристик виробника. Швидкість потоку повітря повинна бути такою, щоб частинки проби не зміщувалися з тарілки для зважування.



Рис. 3.1 – Сушильна шафа*

* Джерело: сформовано автором.



Рис. 3.2 – Тарілка для зважування*

* Джерело: сформовано автором.



Рис. 3.3 – Ваги*

* Джерело: сформовано автором.



Рис. 3.4 – Ексикатор*

* Джерело: сформовано автором.

3.2 Визначення вмісту вологи та зольності

Етапи лабораторного дослідження:

1) Підготовка зразків: Зразки паливних гранул подрібнюються до однорідної маси.

2) Підготовка тарілки для зважування: Потрібно висушити тарілку разом із кришкою в сушильній шафі при температурі $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ до досягнення постійної маси. Потім охолодити до кімнатної температури, помістивши її в ексикатор.

3) Зважування: Зважте охолоджену тарілку з кришкою з точністю до 0,1 г.

4) Додавання Проби: Додайте не менше 1 г досліджуваного матеріалу на тарілку, рівномірно розподіливши його. Зважте тарілку з пробою та кришкою з точністю до 0,1 мг.

5) Сушіння Проби: Висушіть тарілку з пробою, але без кришки, при температурі $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ до досягнення постійної маси. Постійною вважається маса, якщо її зміна не перевищує 1 мг після додаткового нагрівання протягом 60 хвилин. Час сушіння зазвичай триває від 2 до 3 годин [14].

6) Охолодження: Перенесіть закриту тарілку в ексікатор для охолодження до кімнатної температури.

7) Зважування після сушіння: Після охолодження швидко зважте тарілку з пробою з точністю до 0,1 мг, щоб уникнути поглинання вологи, особливо для біопалива з дрібними частинками, яке є дуже гігроскопічним.

Щонайменше два вимірювання потрібно провести з однією пробою для дослідження.

Вміст вологи визначається за формулою:

$$\text{Вміст вологи (\%)} = \frac{\text{Маса вологи}}{\text{Початкова маса зразка}} \times 100, \quad (3.1)$$

де маса вологи визначається як різниця між початковою масою зразка та масою після висушування.

Зольність визначається за формулою:

$$\text{Зольність (\%)} = \frac{\text{Маса золи}}{\text{Початкова маса зразка}} \times 100, \quad (3.2)$$

де маса золи визначається як залишкова маса після спалювання зразка.

Обчислення:

Для кожного вимірювання вологість, M_{ad} , в пробі для дослідження, виражена як відсоток за масою, потрібно обчислити за формулою:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100\% \quad (3.3)$$

m_1 , — маса порожньої тарілки з кришкою, г;

m_2 — маса тарілки з кришкою і пробою до висушування, г;

m_3 — маса тарілки з кришкою і пробєю після висушування, г.

Вологість:

$$M_{1(1)} = 24,042$$

$$M_{2(1)} = 25,093$$

$$M_{3(1)} = 25,003$$

$$M_1 = \frac{25,093 - 25,003}{25,093 - 24,042} = 8,6\%$$

$$M_{1(2)} = 26,455$$

$$M_{2(2)} = 27,491$$

$$M_{3(2)} = 27,408$$

$$M_2 = \frac{27,491 - 27,408}{27,491 - 26,455} = 8\%$$

$$M_{сер} = 8,3\%$$

Зольність:

Тигель №1

$$M_{з\ пробою\ до\ нагріву} = 17,5878$$

$$M_{порожня} = 17,5393$$

$$M_{після\ нагріву} = 17,5615$$

$$M = 17,5878 - 17,5393 = 1,0485$$

$$M = 17,5615 - 17,5393 = 0,022$$

$$x_1 = \frac{0,022 * 100}{1,0485} = 2,1\%$$

Тигель №2

$$M_{з\ пробою\ до\ нагріву} = 21,2768$$

$$M_{порожня} = 20,339$$

$$M_{після\ нагріву} = 20,3595$$

$$M = 21,2768 - 20,339 = 0,9378$$

$$M = 20,3595 - 20,339 = 0,021$$

$$x_2 = \frac{0,021 * 100}{0,9378} = 2,2\%$$

Тигель №3



Рис. 3.5 – Взірці тигель*

* Джерело: сформовано автором.

$$M_{\text{з пробою до нагріву}} = 22,149$$

$$M_{\text{порожня}} = 21,155$$

$$M_{\text{після нагріву}} = 21,1766$$

$$M = 21,2768 - 20,339 = 0,994$$

$$M = 20,3595 - 20,339 = 0,0216$$

$$x_3 = \frac{0,0216 * 100}{0,994} = 2,2\%$$

$$x_{\text{сер}} = 2,2\%$$

Результати експериментальних вимірювань показали наступні характеристики паливних пелет щодо вмісту вологи та зольності:

Вологість для першої проби становила 8,6%; для другої проби – 8%, а середній вміст вологи дорівнює 8,3%.

Зольність для тигля №1 становила 2,1%; тигля №2 – становила 2,2%; для тигля №3 – 2,2%. Середня зольність дорівнює 2,2%.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРАННЯ КАЛОРИМЕТРОМ ІКА С 1

4.1 Проведення експериментального дослідження теплоти згорання Калориметром ІКА С 1

Дослідження теплоти згорання паливних гранул є ключовим етапом у визначенні їх енергетичної ефективності. Для точного вимірювання цього параметру використовують різні типи калориметрів. У даному розділі буде розглянуто експериментальне дослідження теплоти згорання паливних гранул за допомогою калориметра ІКА С 1.

Основною метою цього дослідження є визначення вищої та нижчої теплоти згорання деревних паливних гранул за допомогою калориметра ІКА С 1, а також аналіз впливу різних факторів на результати вимірювань.

Для проведення експерименту використовувалися такі обладнання та матеріали:

- Калориметр ІКА С 1 – сучасний прилад для точного вимірювання теплоти згорання.
- Кріостат RC 2 basic.
- Аналітичні ваги – для точного зважування зразків.
- Паливні гранули з деревини – основний матеріал дослідження.
- Кисень високої чистоти – для забезпечення повного згорання зразків.

Калориметр ІКА С 1 – це маленький гігант, що є гігантським стрибком вперед у розвитку калориметрів з кисневою бомбою і задає новий стандарт на майбутнє [15].

Обчислення температурних значень здійснюється класичним ізопериболічним методом за формулою Реньо-Пфаундлер. Для роботи з ПК використовується програмне забезпечення ІКА С 6040 Calwin [16]. Додатково до цієї моделі додано кріостат RC 2 basic.



Рис. 4.1 – Калориметр ІКА С 1*

* Джерело: [15].

У таблиці 4.1 наведено основні захаактеристики калориметра ІКА С 1 для цілей дослідження.

Таблиця 4.1 – Характеристики калориметра ІКА С 1 [17].

Показник	Значення
Діапазон вимірювання (Дж)	40000
Режим вимірювання статична оболонка при 22 °С	Так
Режим вимірювання статична оболонка при 30 °С	Так
Вимірювань на годину статична оболонка	4
Відтворюваність статична оболонка (1 г бензойної кислоти NBS39i)	0,15% відхилення
Робоча температура	20-30 °С
Робочий тиск кисню (макс)	1,5 бар
Інтерфейс для підключення RS232	Так
USB-порт	Так
Напуск кисню в посуд для розкладання	Так
Випуск кисню із посудини для розкладання	Так
Вбудований посуд розкладання	Так
Оцінка згідно з DIN 51900	Так
Оцінка згідно з ISO 1928	Так
Розміри (мм)	290 x 280 x 300
Вага (в залежності від комплектації)	15-55,8 кг
Клас захисту згідно з DIN EN 60529	IP 20
Напруга	100-240 В
Частота	50/60 Гц
Потужність	120 Вт
Країна походження	Німеччина

На рисунках 4.2-4.5 зображено засоби для проведення дослідження.



Рис. 4.2 – Криостат RC 2 basic*



Рис. 4.3 – Балон з киснем*



Рис. 4.4 – Лабораторний прес*



Рис. 4.5 – Нитка бавовняна*

* Джерело: сформовано автором.

Методика проведення експерименту наступна:

1. Підготовка зразків:

- Вибір та підготовка 15 зразків (по 5 з кожного типу біомаси).
- Висушування зразків до стандартного рівня вологості (близько 7%).

2. Перевірка калориметра:

- Калібрування калориметра за допомогою стандартних речовин з

відомою теплотворною здатністю.

- Перевірка чистоти реакційної камери та заповнення її киснем.
3. Зважування зразків:
- Точне зважування кожного зразка (приблизно 1 грам).
4. Поміщення зразка в камеру згорання:
- Зразок пелет поміщується в бомбову камеру калориметра.
 - Камера герметично закривається і заповнюється киснем під високим тиском.
5. Запуск процесу згорання:
- Зразок запалюється електричним підпалювачем.
 - В процесі згорання виділяється енергія, яка нагріває воду, що оточує реакційну камеру.
6. Вимірювання змін температури:
- Калориметр автоматично реєструє зміну температури води.
 - Використовуючи ці дані, прилад розраховує теплоту згорання зразка.



Рис. 4.6 – Підготовка капсули калориметра*

* Джерело: сформовано автором.

Таблиця 4.2 – Маса кожного зрізця сировини*

№	Хвоя пелета	Хвоя тирса	Бук тирса
1	0,5321	0,5221	0,3656
2	0,6077	0,6653	0,4219
3	0,6667	0,6065	0,4345
4	0,6689	0,6823	0,4762
5	0,6593	0,7045	0,5106
Маса (г)			

* Джерело: сформовано автором.

Результати вимірювань наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Питома теплота згорання (Q) для кожного зразка*

№	Хвоя пелета	Хвоя тирса	Бук тирса
1	0,016993	0,017187	0,019987
2	0,016458	0,016837	0,020278
3	0,015923	0,017011	0,020346
4	0,015788	0,016835	0,020562
5	0,015853	0,016747	0,020742
Питома теплота згорання (МДж)			

* Джерело: сформовано автором.

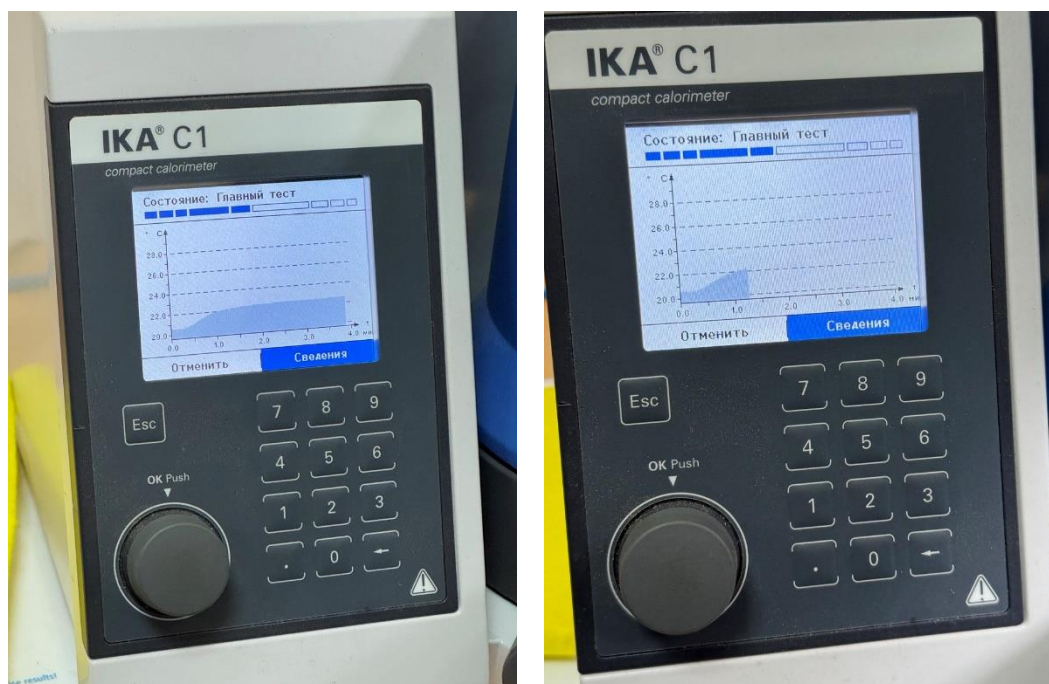


Рис. 4.7 – Графік дослідження*

* Джерело: сформовано автором.



Рис. 4.8 – Результаты дослідження*

* Джерело: сформовано автором.



Рис. 4.9 – Залишки взірців сировини*

* Джерело: сформовано автором.

Аналіз результатів:

- Гранули з хвої: Показали стабільні значення теплоти згорання в межах 15853-16993 Дж, що вказує на їх помірну теплотворну здатність.
- Тирса з хвої: Демонструє дещо вищу теплоту згорання, з діапазоном 16747-17187 Дж, що робить їх ефективнішими порівняно з гранулами з хвої.
- Тирса з бука: Має найвищі показники теплоти згорання, від 19987 до 20742 Дж, що свідчить про їх вищу енергетичну цінність.

4.2 Вартість проведення вимірювання визначення питомої теплоти згорання однієї паливної гранули

Проведення одного вимірювання питомої теплоти згорання за допомогою калориметра ІКА С 1 включає кілька витратних етапів:

Вартість обладнання: Калориметр ІКА С 1 є високотехнологічним пристроєм з ціною в діапазоні від 20,000 до 30,000 євро. Це означає, що амортизаційні витрати на один тест можуть бути значними, особливо якщо

враховувати термін служби обладнання та його технічне обслуговування.

Матеріальні витрати: для кожного тесту необхідні витратні матеріали, такі як зразки паливних гранул, кисень для згорання, дистильовану воду, нитка бавовняна. Середня вартість цих матеріалів для одного вимірювання може становити від 68 грн.

Часові витрати та витрати на оплату праці роботи оператора: один тест займає приблизно 25-30 хвилин, враховуючи підготовку, проведення вимірювання та обробку даних. Це враховує також час оператора, який забезпечує належну експлуатацію обладнання та виміри й розрахунки, аналітику даних і висновки.

Таблиця 4.4 – Економічний розрахунок витрат на проведення одного вимірювання визначення питомої теплоти згорання однієї паливної гранули*

№ п/п	Показник	Од. вимірювання	Норми витрачання	Витрати, грн	Розрахунок	Примітка
1	2	3	4	5	6	7
1	Вартість роботи обладнання Калориметр ІКА С 1, вартість 1 290 000 грн, 10 років роботи за технічною документацією [15]	хв	7	1,72	$1\,290\,000 \cdot 10 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 7 / 60 = 1,72$	Розраховано з урахуванням експлуатаційного часу роботи обладнання
2	Матеріальні витрати:					
2.1	Зразки паливних гранул, ціна за 1 т 8 500 грн	г	1	0,01	$8\,500 / 1000000 = 0,01$	-
2.2	Кисень для згорання, ціна за 10 л 3 000 грн	м ³	0,1	30,00	$0,1 \cdot 3\,000 / 10 = 30$	-
	Дистильовану воду, ціна за 1 л 12,20 грн	л	3	0,74	$3 \cdot 12,2 / 50 = 0,74$	-
2.3	Нитка бавовняна, ціна за 500 шт 2 700 грн	шт.	1	5,40	$2700 / 500 = 5,40$ грн	-
2.4	Електроенергія , Ціна 5,92087 грн за 1 кВт без ПДВ	кВт	0,25	1,78	$5,92087 \cdot 1,2 \cdot 0,25 = 1,78$	Ціна за 1 кВт/год станом на 31.05.2024 р.

Продовження табл. 4.4

3	Витрати на оплату праці оператора, погодинна оплата праці 48 грн / год, ЄСВ	хв	30	29,28	$48 * 1,22 * 0,5 = 29,28$	Мінімальна зарплата (погодинна) з 01.04.2024 р.
4	Інші непрямі витрати, частка від прямих витрат	%	30	20,68	$68,93 * 0,3 = 20,68$	-
5	Разом витрат	грн	-	89,61	$68,93 + 20,68 = 89,61$	-
6	Кількість вимірювань	од.	15	-	-	Для досліду потрібно 15 вимірювань (в середньому)
7	Всього	грн	-	1 344,15	$89,61 * 15 = 1 344,15$	-

* Джерело: розраховано автором.

Вартість проведення одного вимірювання питомої теплоти згорання може варіюватися від 1345 грн, враховуючи амортизацію обладнання, витратні матеріали та час роботи.

Загалом визначення питомої теплоти згорання пелет є важливим для оцінки їх енергоефективності. Використання калориметричних методів, таких як калориметр ІКА С 1, дозволяє точно вимірювати енергетичний потенціал біопалива, що є суттєвим для прийняття рішень щодо його використання. Проведене дослідження з використанням калориметра ІКА С 1 підтвердило його високу ефективність та точність у визначенні теплоти згорання паливних гранул. Це дозволяє отримувати достовірні дані про енергоефективність різних видів біопалива.

Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні їх для оптимізації витрат на енергію, вибираючи найбільш ефективні види паливних гранул.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження були проаналізовані сучасні методи та технології визначення теплоти згорання дерев'яних паливних гранул, що є критично важливим для оцінки їхньої енергетичної ефективності та якості.

Основні висновки з проведеного дослідження роботи можна сформулювати наступним чином:

1. Застосування паливних гранул в Україні є важливим кроком до забезпечення енергетичної незалежності та сталого розвитку загалом. Використання різних видів сировини для виробництва пелет дозволяє оптимально використовувати доступні ресурси і знижувати вартість енергоносіїв для населення. Розвиток технологій виробництва та спалювання пелет сприятиме підвищенню ефективності енергетичної системи України і зниженню негативного навантаження на навколишнє середовище.

2. Визначення теплоти згорання пелет є критично важливим для оцінки їхньої енергоефективності. Технології, такі як калориметричні методи, дозволяють точно вимірювати енергетичний потенціал біопалива. Точні методи вимірювання уможливають визначити найбільш ефективні види пелет, що сприяє оптимізації їх використання в енергетичній галузі та зниженню залежності від традиційних видів палива.

3. Процес виробництва паливних гранул є складним і багатоетапним, вимагаючи ретельної координації всіх елементів установки. Від підготовки сировини до упаковки готового продукту, кожен етап має значення для досягнення високої якості кінцевого продукту.

4. Проведене дослідження з використанням калориметра ІКА С 1 підтвердило його високу ефективність та точність у визначенні теплоти згорання паливних гранул. Це відкриває значні можливості для подальших досліджень у сфері відновлювальної енергетики, оскільки це дозволяє аналізувати енергетичні характеристики різних видів сировини.

5. Експериментальне дослідження підтвердило, що пелети з тирси бука є найбільш ефективними з точки зору енерговіддачі, тоді як з хвойних дерев і їх тирси поступаються за цим показником. Це означає, що при виборі сировини для виробництва пелет необхідно враховувати не лише доступність матеріалу, але й його енергетичну цінність. Використання більш ефективних матеріалів дозволить знизити витрати на паливо та підвищити загальну ефективність енергетичних систем загалом.

6. Визначення питомої теплоти згорання пелет є критично важливим для оцінки їх енергоефективності. Використання калориметричних методів, таких як калориметр ІКА С 1, дозволяє точно вимірювати енергетичний потенціал біопалива, що є суттєвим для прийняття рішень щодо його використання. Експериментальні дослідження показали, що пелети з тирси бука мають найвищу енергоефективність, тоді як пелети з хвойних дерев поступаються за цим показником. Це важливе відкриття для вибору найбільш ефективного виду палива для виробництва.

Однак, економічні витрати на проведення одного вимірювання питомої теплоти згорання можуть варіюватися від 1 345 грн, враховуючи амортизацію обладнання, витратні матеріали та час роботи оператора. Це підкреслює необхідність оптимізації витрат при проведенні регулярних тестів. Виробники пелет не завжди проводять виміри енергоефективності своєї продукції, що може призводити до недостовірної інформації для споживачів. Проведення таких вимірів є необхідним для забезпечення високої якості продукції та надання споживачам достовірних даних про енергоефективність пелет.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карпаш М. О., Тацакович Н. Л., Яворський А. В., Попович О. В. Проблеми впровадження науково-інноваційних заходів з енергоефективності на теренах України. Нафтогазова енергетика-2015 : мат. міжнар. наук.-тех. конф., Івано-Франківськ, 2015. URL: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/7290/1/6886p.pdf> (дата звернення 02.03.2024).
2. Карпаш М. О., Яворський А. В., Тацакович Н. Л., Дмитрученко І. М., Білик Б. І. Сталій енергетичний розвиток м. Івано-Франківська – план дій. Нафтогазова енергетика, 2014. С. 119-128. URL: https://www.mvk.if.ua/uploads/files/sr030914_1.pdf (дата звернення 02.03.2024).
3. Енергетична верба: технологія вирощування та використання / за заг. ред. В. М. Сінченка. Вінниця : НіландЛТД, 2015. 340 с. URL: https://bio.gov.ua/sites/default/files/documentation/energetychna_verba.pdf (дата звернення 10.04.2024).
4. ДСТУ 8358:2015. Брикети та гранули паливні з деревинної сировини. Технічні умови. Київ: УкрНДНЦ, 2017. 14 с. URL: <https://www.scribd.com/document/638028341/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-8358-2015-%D0%BF%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%B8-%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BD%D0%B8> (дата звернення 15.03.2024).
5. Кузнецова А. Виробництво пелет в Україні: прибутковий варіант сталого розвитку? Німецько-український аграрний діалог. 2012 24 с. URL: http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy_papers/Agriculture_dialogue/2012/P37_Pellets_UKR_f.pdf (дата звернення 10.03.2024).
6. Технологія виготовлення паливних гранул (пеллет). Біопал-ІФ : веб-сайт. URL: <https://www.biopal-if.com/technology.html> (дата звернення 21.03.2024).
7. Pellets. Definition and propertiesurl. ETIP Bioenergy European Technology and Innovation Platformhttps : web-site URL: <http://www.etipbioenergy.eu/value->

chains/feedstocks/forestry/pellets (дата звернення 04.06.2024).

8. Організація і економіка використання біоресурсів: підручник / Г. М. Калетник, О. П. Скорук, Д. М. Токарчук. Вінниця: ВНАУ, 2018. 297 с. URL: <http://repository.vsau.org/getfile.php/25421.pdf> (дата звернення 11.03.2024).

9. Основні етапи виробництва пеллет. BIOWAT: веб-сайт. URL: <http://www.biowatt.com.ua/informatsiya/osnovni-etapi-virobnitstva-pellet/> (дата звернення 12.03.2024).

10. Степанов Д. В., Корженко Є.С., Боднар Л. А. Теплота згорання палива. Котельні установки промислових підприємств. Вінниця : ВНТУ. 2011. 120 с. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/stepanov_kotelniustanov/p2-2.html (дата звернення 21.05.2024).

11. Michael Zimmermann. Using the Calorimetric Method to Verify Dynamic Power Device Analyzer Switching Energy Calculations. EE Power. Technical article. December 15, 2021. URL: <https://eepower.com/technical-articles/using-the-calorimetric-method-to-verify-dynamic-power-device-analyzer-switching-energy-calculations/#> (дата звернення 23.05.2024).

12. Автоматичний бомбовий калориметр SDAC6000. Облана. Обладнання наукове : веб-сайт. URL: <https://oblana.com/ua/p1186702465-avtomaticheskij-bombovuj-kalorimetr.html> (дата звернення 22.05.2024).

13. Клименко Н. М., Чернищенко М. Л. Вивчення зміни властивостей матеріалів при впливі температури та при взаємодії з різними газами. Сучасні інформаційні технології та телекомунікаційні мережі. 2020 р. : матеріали 55 наук.-конф. молодих дослідників ОНПУ. Одеса: ОНПУ, 2020. С. 37-39. URL: http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11407/1/37-39_%D0%A7%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE.pdf (дата звернення 02.04.2024).

14. ДСТУ EN 14774-3:2013. Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі. Ч. 3. Волога в пробі для загального аналізу [EN 14774-3:2009, IDT]. Київ: Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». 2013. URL:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60456 (дата звернення 08.05.2024).

15. Калориметр ІКА С 1. Ventalab : веб-сайт. URL: <https://ventalab.ua/kalorimetr-ika-c-1-package-1-10-z-okholodzhuvachem/> (дата звернення 12.05.2024).

16. RC 2 basic : ІКА. designed for scientists. URL: <https://www.ika.com/en/Products-LabEq/Temperature-Control-pg272/RC-2-basic-4171000/> (дата звернення 12.05.2024).

17. C 1 Package 1/10. ІКА. designed for scientists. URL: <https://www.ika.com/en/Products-LabEq/Calorimeters-pg330/C-1-Package-110-10000567/> (дата звернення 12.05.2024).

18. ISO 17225-2:2021(en) Solid biofuels : Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets. *Online Browsing Platform (OBP)* : web-site. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:17225:-2:ed-2:v1:en> (дата звернення 12.05.2024).