

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»  
КАФЕДРА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА  
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

**Пояснювальна записка**

до дипломного проєкту  
бакалавра

на тему : **Дослідження теплотворної здатності та екологічної безпечності  
брикетів з біомаси**

Виконала: студентка 4 курсу,  
групи 401-НТ  
спеціальності  
144 Теплоенергетика  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)  
Передерій А.С.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Чернецька І.В.  
(прізвище та ініціали)

Допустити до захисту:  
завідувач кафедри "Теплогазопостачання,  
вентиляції та теплоенергетики" \_\_\_\_\_ к.т.н., проф. Голік Ю.С.  
" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

Полтава – 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення навчально-науковий інститут нафти і газу

Кафедра, циклова комісія кафедра теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Напрямок підготовки \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**теплогазопостачання, вентиляції та**  
**теплоенергетики**

Голік Ю.С.

" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 року

### **ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Передерій Аліні Сергіївні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **“Дослідження теплотворної здатності та екологічної безпечності брикетів з біомаси”**  
керівник роботи Чернецька І.В., к.т.н.

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

затвержені наказом вищого навчального закладу №306/1-фа від 03.03.2025

2. Строк подання студентом роботи 18.06.2025 року

3. Вихідні дані до роботи: завдання на проектування видане керівником кваліфікаційної роботи бакалавра

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):  
Огляд літературних джерел. Аналіз біомаси як альтернативного джерела енергії та перспектив використання опалого листя. Методи брикетування біомаси. Методика визначення теплотворної здатності палива. Експериментальні дослідження еколого-теплотехнічних характеристик біомаси. Порівняння характеристик досліджених зразків з іншими видами палива.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень): Схема установки для

брикетування. Фото установки. Фото процесу виготовлення брикетів та отриманих зразків. Фото експериментальних досліджень. Таблиці результатів експериментів та порівняльного аналізу.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Фахова частина	Чернецька І.В., к.т.н., доцент	28. 04. 2025	18.06. 2025

7. Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту	Примітка
1	Розробка схеми установки для пресування біомаси.	28.04 – 5.05.2025	
2	Створення установки та її монтаж.	6.05 – 7.05. 2025	
3	Огляд та вибір видів біомаси для дослідів.	8.05 – 15.05. 2025	
4	Проведення дослідів та їх розрахунок.	16.05 – 28.05. 2025	
5	Розрахунок та висновки виходячи із дослідницьких даних.	29.05 – 9.06. 2025	
6	Оформлення дипломної роботи.	10.06 – 15.06. 2025	
7	Висновки. Література. Здача роботи на перевірку.	16.06 – 18.06. 2025	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Передерій А.С.  
(прізвище та ініціали)

Чернецька І.В.  
(прізвище та ініціали)



## ВСТУП

Сучасний стан енергетичної галузі характеризується високим рівнем залежності від традиційних викопних джерел енергії — нафти, природного газу та вугілля. Вичерпність цих ресурсів, зростання їх вартості на світовому ринку, а також негативний вплив на довкілля стимулюють пошук та впровадження альтернативних, відновлювальних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів розвитку стало використання біомаси, яка є поновлюваною, екологічно безпечною та доступною сировиною для отримання теплової енергії.

В умовах України, де спостерігається значна сезонна кількість органічних відходів рослинного походження, зокрема опалого листя, актуальним є дослідження можливостей його ефективної утилізації. Опале листя зазвичай не використовується як ресурс, а його спалювання на відкритому повітрі призводить до суттєвого забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсними частками, оксидами вуглецю та іншими шкідливими речовинами, а також значними пожежами, що призводить до знищення місцевої флори та фауни. Таким чином, постає необхідність розробки технологій, які дозволять перетворити дану біомасу на корисний енергетичний продукт, мінімізуючи екологічні ризики.

Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є виготовлення твердого біопалива у формі брикетів з опалого листя. Брикетування дозволяє підвищити щільність та зручність транспортування біомаси, полегшує зберігання та використання палива, а також забезпечує більш стабільні характеристики згоряння. Разом з тим, необхідно дослідити теплотворну здатність брикетів із листя, визначити доцільність використання додаткових компонентів (зв'язуючих речовин), вивчити рівень шкідливих викидів при їх згорянні та оцінити економічну ефективність їх виробництва.

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена потребою у розробці екологічно безпечних та енергетично ефективних способів утилізації рослинних відходів, пошуком альтернативних джерел теплової енергії, а також відсутністю достатньо повного науково-технічного обґрунтування щодо використання опалого листя як сировини для твердого біопалива.

**Мета роботи** — провести експериментальне дослідження теплотворної здатності та екологічної безпечності брикетів, виготовлених з опалого листя, та оцінити техніко-економічну доцільність їх виробництва.

Для досягнення мети поставлено такі основні завдання:

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

1. проаналізувати сучасний стан використання відновлювальних джерел енергії в Україні та за кордоном, їх переваги і обмеження;
2. дослідити фізико-хімічні властивості опалого листя як виду біомаси;
3. розробити та виготовити установку для брикетування біомаси;
4. визначити оптимальні рецептури брикетів та виготовити пробні зразки;
5. провести експериментальні вимірювання теплотворної здатності брикетів;
6. оцінити рівень шкідливих викидів при згорянні брикетів;
7. здійснити розрахунок економічної ефективності виробництва біопалива з листя.

**Об'єктом дослідження** є брикети з опалого листя як вид твердого біопалива.

**Предметом дослідження** виступають теплотехнічні характеристики та екологічні показники процесу виготовлення і згорання брикетів з біомаси.

**Наукова новизна** роботи полягає у дослідженні малопоширеного виду біомаси — опалого листя — як потенційно придатної сировини для виробництва біопалива, а також у розробці простої установки для пресування та визначенні доцільних параметрів виготовлення брикетів.

**Практична цінність роботи** полягає у можливості застосування результатів дослідження в комунальному господарстві, на локальних котельнях, а також у приватному секторі для заміщення традиційних видів палива.

Структура дипломної роботи включає вступ, 4 розділа, висновки, та список використаних джерел.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

### 2.1. Відновлювальні джерела енергії: сучасний стан у світі та Україні

У 2024 році світова енергетика продовжила активний перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що зумовлено необхідністю зменшення викидів парникових газів, підвищення енергетичної безпеки та зниження залежності від викопних палив. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), у 2024 році глобальна потужність ВДЕ зросла на рекордні 15,1%, досягнувши 4 448 ГВт. Близько 90% нових потужностей припадало на сонячну та вітрову енергетику .

Сонячна енергетика демонструє особливо стрімке зростання. Наприклад, у країнах Східної Європи, таких як Польща, Угорщина та Румунія, встановлена потужність сонячних електростанцій зросла з 9 ГВт у 2019 році до 46 ГВт у 2024 році, що становить збільшення на 450% .

Індія також досягла значного прогресу в галузі ВДЕ. У 2024 році країна додала рекордні 30 ГВт потужностей чистої енергії, що дозволило зменшити частку вугільної генерації в енергетичному міксі до менш ніж 50% .

#### Стан та перспективи ВДЕ в Україні:

В Україні розвиток ВДЕ має стратегічне значення для забезпечення енергетичної незалежності та виконання міжнародних зобов'язань щодо зменшення викидів парникових газів. Станом на початок 2024 року встановлена потужність ВДЕ в Україні становила 8,7 ГВт, що включає 6 ГВт сонячної енергетики, 2 ГВт вітрової та 0,2 ГВт біоенергетики .

У серпні 2024 року Україна затвердила Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року, який передбачає досягнення 27% частки ВДЕ в кінцевому споживанні електроенергії та 25% у виробництві електроенергії. Для реалізації цих цілей планується встановити 12,2 ГВт сонячної енергетики (з них 5 ГВт — виробництво споживачами), 6,2 ГВт вітрової енергетики (включаючи 100 МВт офшорної) та 876 МВт біоенергетики .

Біоенергетика, зокрема використання біомаси, має значний потенціал в Україні, особливо в контексті децентралізованого теплозабезпечення та утилізації органічних відходів. За оцінками експертів, розвиток біоенергетики сприятиме не лише зменшенню викидів, але й створенню нових робочих місць та підвищенню енергетичної безпеки країни .

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2. Переваги та недоліки альтернативних джерел енергії

### Переваги ВДЕ:

#### 1. Екологічна безпечність

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) сприяють зменшенню викидів парникових газів та інших шкідливих речовин, що позитивно впливає на стан довкілля. Наприклад, у 2024 році частка електроенергії, виробленої з чистих джерел, вперше перевищила 40% глобального попиту, що свідчить про значний внесок ВДЕ у зниження вуглецевого сліду [1].

#### 2. Відновлюваність ресурсів

На відміну від викопних палив, ресурси ВДЕ, такі як сонячне світло, вітер та біомаса, є поновлюваними, що забезпечує довгострокову енергетичну безпеку.

#### 3. Децентралізація енергопостачання

ВДЕ дозволяють створювати локальні енергетичні системи, що зменшує залежність від централізованих мереж та підвищує стійкість до зовнішніх впливів.

#### 4. Економічна ефективність

З розвитком технологій вартість виробництва електроенергії з ВДЕ знижується. Зокрема, у 2024 році глобальна потужність відновлюваної енергетики зростає на рекордні 15,1%, досягнувши 4 448 ГВт, що свідчить про економічну привабливість інвестицій у цей сектор.

#### 5. Створення нових робочих місць

Розвиток ВДЕ сприяє створенню нових робочих місць у галузях виробництва, монтажу та обслуговування обладнання, що позитивно впливає на економіку.

### Недоліки ВДЕ:

#### 1. Залежність від природних умов

Ефективність ВДЕ залежить від погодних умов. Наприклад, сонячні електростанції менш ефективні в похмурі дні, а вітрові — при слабкому вітрі, що може призводити до нестабільності енергопостачання.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. Високі початкові інвестиції

Хоча експлуатаційні витрати ВДЕ низькі, початкові капіталовкладення у встановлення обладнання можуть бути значними, що може стримувати розвиток, особливо в країнах з обмеженими фінансовими ресурсами.

## 3. Проблеми з інтеграцією в енергосистему

Інтеграція ВДЕ в існуючі енергетичні системи може вимагати модернізації інфраструктури та впровадження нових технологій для балансування навантаження.

## 4. Використання земельних ресурсів

Деякі види ВДЕ, такі як великі сонячні або вітрові електростанції, потребують значних земельних площ, що може викликати конфлікти щодо землекористування.

## 5. Вплив на екосистеми

Будівництво гідроелектростанцій може призводити до змін у водних екосистемах, а вітрові турбіни — впливати на птахів та інших тварин.

### 2.3. Біомаса як джерело енергії: види, характеристики, застосування

#### Енергетичний потенціал біомаси в Україні

Україна володіє значним потенціалом біомаси для енергетичних потреб. Згідно з оцінками, енергетичний потенціал біомаси в Україні становить понад 20 млн тонн нафтового еквівалента на рік. Основними джерелами біомаси є:

1. Сільськогосподарські відходи: солома, стебла кукурудзи, лушпиння соняшника та інші залишки рослинництва.
2. Лісові ресурси: відходи деревообробної промисловості, обрізки дерев та інші лісові залишки.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

3. Органічні відходи: відходи харчової промисловості, побутові органічні відходи, опале листя.

Зокрема, опале листя, яке утворюється в значних обсягах у міських та сільських районах, є перспективним джерелом біомаси для виробництва паливних брикетів.

### **Поточний стан біоенергетики в Україні**

Біоенергетика займає важливе місце в структурі відновлюваних джерел енергії України. Станом на початок 2024 року, встановлена потужність біоенергетичних установок (біомаса та біогаз) становила 319 МВт, з прогнозом збільшення до 876 МВт до 2030 року .

У 2020 році виробництво теплової енергії з біомаси досягло 2,797 млн тонн нафтового еквівалента, що становить близько 98% від усієї відновлюваної теплової енергії в Україні . Це свідчить про домінуючу роль біоенергетики в секторі тепlopостачання.

### **Перспективи розвитку біоенергетики до 2030 року**

Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року передбачає значне зростання використання біомаси для виробництва енергії. Зокрема, планується:

1. Збільшення виробництва електроенергії з біомаси: до 3 850 ГВт·год на рік, що потребуватиме встановлення нових біоенергетичних потужностей загальною потужністю близько 876 МВт .

2. Розвиток виробництва теплової енергії з біомаси: планується досягти 5,749 млн тонн нафтового еквівалента на рік до 2030 року .

3. Використання біогазу: очікується виробництво 235 тис. тонн нафтового еквівалента біогазу на рік до 2030 року .

Ці заходи сприятимуть зменшенню залежності від імпортованих енергоносіїв, підвищенню енергетичної безпеки та зниженню викидів парникових газів.

### **Використання опалого листя як джерела біомаси**

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Опале листя є доступним та відновлюваним джерелом біомаси, особливо в міських умовах. Його використання для виробництва паливних брикетів має кілька переваг:

1. Екологічна утилізація відходів: переробка опалого листя зменшує обсяги твердих побутових відходів та запобігає їх спалюванню, що часто практикується в Україні, спричиняючи забруднення повітря.
2. Виробництво екологічного палива: брикетоване листя може слугувати альтернативним джерелом енергії для опалення приватних будинків, теплиць та інших об'єктів.
3. Зменшення викидів парникових газів: використання біопалива з листя сприяє зниженню викидів CO<sub>2</sub> порівняно з традиційними видами палива.

Однак необхідні подальші дослідження щодо ефективності та безпеки використання листяної біомаси для енергетичних потреб, зокрема аналіз теплотворної здатності, вмісту вологи та можливих шкідливих викидів під час згоряння.

### **Технічні аспекти брикетування біомаси**

Для ефективного використання опалого листя як палива необхідно застосовувати відповідні технології брикетування. Серед доступного обладнання на українському ринку можна виділити:

Ударний прес для брикетів "Ecopress": високопродуктивний прес, призначений для брикетування різних видів біомаси, включаючи листя.

Прес для брикетування тирси Nano E55: компактний пристрій, який підходить для малих та середніх підприємств.

Лінія для брикетів "Ecopress DUO": автоматизована лінія для масового виробництва паливних брикетів.

Вибір конкретного обладнання залежить від обсягів сировини, доступного бюджету та вимог до продуктивності.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## **Економічна доцільність виробництва брикетів з опалого листя**

Виробництво паливних брикетів з опалого листя може бути економічно вигідним за умови налагодження ефективного процесу збору, сушіння, промивання, подрібнення та брикетування сировини.

### **Основні фактори, що впливають на рентабельність:**

Вартість сировини: опале листя є безкоштовним або маловартісним ресурсом, що знижує собівартість продукції.

Витрати на обладнання: інвестиції в пресове обладнання можуть бути значними, але окупаються за рахунок стабільного попиту на екологічне паливо.

Ринок збуту: наявність споживачів, зацікавлених у використанні біопалива, забезпечує стабільний дохід.

Загалом, при правильному підході до організації виробництва, брикети з опалого листя можуть стати конкурентоспроможним та екологічно чистим джерелом енергії в Україні.

## **2.4. Перспективи використання опалого листя для отримання енергії**

Використання біомаси як відновлюваного джерела енергії набуває дедалі більшого значення в контексті глобального потепління, зменшення залежності від викопного палива та підвищення рівня енергетичної безпеки. Одним із ключових аргументів на користь біоенергетики є її потенційна екологічна нейтральність або принаймні суттєве зниження викидів шкідливих речовин у порівнянні з традиційними джерелами енергії. Проте екологічні переваги біомаси значною мірою залежать від типу біопалива, способу його підготовки, умов згоряння, а також масштабу використання.

### **Зменшення викидів парникових газів**

Біомаса вважається вуглецево нейтральним джерелом енергії, оскільки вуглець, який вивільняється під час її згоряння, еквівалентний тому, що був поглинутий рослинами під час їхнього росту. Це означає, що при сталому

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використанні біомаси баланс викидів CO<sub>2</sub> може бути нульовим. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), при заміні 1 тонни умовного палива біопаливом можливо уникнути викиду до 3 тонн CO<sub>2</sub>-еквівалента.

В Україні, де основна частина теплової енергії генерується з природного газу, заміщення його біомасою може істотно скоротити обсяг викидів. Наприклад, згідно з даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності), використання біомаси дозволяє скоротити викиди парникових газів на 70–90% порівняно з вугіллям або мазутом.

### **Викиди твердих частинок та інших забруднювачів**

Попри свої переваги, згоряння біомаси супроводжується викидом твердих частинок (PM), летких органічних сполук (ЛОС), оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), оксидів сірки (SO<sub>2</sub>) та інших речовин, які можуть бути шкідливими для здоров'я людини та довкілля. Особливо це стосується неорганізованого або неконтрольованого спалювання біомаси, наприклад, опалого листя у відкритих умовах, що заборонено в Україні згідно з статтею 152 Кодексу України про адміністративні правопорушення [1].

Контрольоване спалювання у сертифікованих котлах або печах із сучасними системами фільтрації дозволяє значно зменшити рівень шкідливих викидів. Наприклад, згідно з дослідженнями Інституту технічної теплофізики НАН України, вміст шкідливих речовин при спалюванні твердого біопалива в сучасних піролізних котлах у 2–3 рази нижчий, ніж у традиційних побутових твердопаливних системах.

### **Забруднення ґрунтів та води**

Процес збирання та переробки біомаси повинен враховувати можливі ризики для довкілля. Надмірне вилучення рослинних залишків, зокрема соломи або листя, без врахування потреб ґрунту в органічній речовині може призвести до виснаження ґрунтів та зниження їх родючості. Крім того, неправильне зберігання або компостування біомаси може спричинити витік органічних сполук у ґрунтові води та поверхневі водойми.

Особливої уваги потребує переробка опалого листя, яке в умовах міста може містити важкі метали, зокрема свинець, кадмій, мідь та цинк, накопичені з атмосферних опадів та пилу. Тому перед використанням листя для енергетичних потреб доцільно проводити хімічний аналіз на вміст забруднювачів. Такий підхід відповідає нормам ДСТУ 2326-93 Котли

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

опалювальні водогрійні [2], що передбачає контроль за вмістом шкідливих домішок у паливній сировині.

### **Використання золошлаків та попелу**

При спалюванні біомаси утворюється значна кількість золи, яка може становити від 1 до 10% маси палива залежно від типу біомаси. Зола можна використовувати як мінеральне добриво, якщо її хімічний склад не перевищує встановлені санітарні норми. Наприклад, ДСТУ 7879:2015 Добрива мінеральні. Визначання вмісту амонійного азоту в простих амонійних добривах потенціометричним методом [3] встановлює гранично допустимі концентрації свинцю, кадмію та ртуті в добривах.

Водночас, якщо в паливі або біомасі присутні небезпечні елементи, попіл може кваліфікуватися як небезпечний відхід, що потребує спеціальної утилізації відповідно до вимог Закону України № 2320-ІХ від 20.06.2022 «Про управління відходами» [4] та ДСТУ 4462.0.01:2005 «Поводження з відходами» [5].

## **2.5. Методи брикетування біомаси: огляд обладнання та технологій**

Брикетування біомаси є одним з найефективніших способів перетворення низькоенергетичних органічних відходів на щільне тверде біопаливо з покращеними характеристиками зберігання, транспортування та згорання. Процес брикетування передбачає стискання подрібненої біомаси під тиском із або без додавання зв'язувальних речовин з метою утворення щільних циліндричних, кубічних чи іншої форми брикетів. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від типу біомаси, фізико-хімічних властивостей сировини, обраної технології пресування та параметрів устаткування.

### **Класифікація методів брикетування**

Загалом методи брикетування біомаси поділяються на дві основні групи:

1. Механічні методи брикетування (сухе пресування):

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

В основі лежить застосування високого механічного тиску для злипання часток біомаси без використання зовнішніх зв'язувальних речовин. При цьому внаслідок тертя та стиснення температура матеріалу може досягати 120–150 °С, що сприяє частковій пластифікації лігніну — природного полімеру, який виконує функцію зв'язувальної речовини.

## 2. Гідравлічні та гідромеханічні методи:

Застосовуються в малопотужних установках і забезпечують менші тиски (до 100 МПа), порівняно з ударно-механічними методами. Забезпечують виробництво брикетів невеликої щільності (600–800 кг/м<sup>3</sup>).

## 3. Термічне брикетування (піролізне, карбонізоване):

Передбачає попередню термічну обробку біомаси (карбонізацію) з метою зменшення вмісту летких речовин і підвищення теплоти згорання. Такі брикети мають темно-сірий або чорний колір, високу щільність, крихкість і менший вміст диму при згоранні.

## 4. Зв'язувальне брикетування (мокре або із додаванням зв'язуючих речовин):

Застосовується переважно для матеріалів із низьким вмістом природних полімерів (наприклад, листя, трава), які самостійно не формують стабільні брикети. Як зв'язуючі речовини можуть використовуватись: крохмаль, глина, вапно, лігносульфонати, органічні смоли.

## Типи обладнання для брикетування

Залежно від типу механізму ущільнення, розрізняють кілька типів пресів для брикетування біомаси [6]:

### а) Шнекові преси (екструдери)

Шнекові преси стискають біомасу за допомогою обертального гвинта (шнека), який подає матеріал у металеву втулку, де відбувається ущільнення. Зазвичай температура у втулці сягає 200–300 °С, що дозволяє пластифікувати лігнін.

Переваги:

Висока щільність брикетів (до 1200 кг/м<sup>3</sup>)

Компактна форма готової продукції

Можливість переробки вологих матеріалів (до 15–18% вологості)

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Недоліки:

Високе енергоспоживання

Зношення шнека через тертя

Високі вимоги до попередньої підготовки сировини (подрібнення до <5 мм)

б) Плунжерні (механічні) преси

Принцип дії полягає у тому, що поршень (плунжер), рухаючись вперед-назад, ущільнює сировину в прес-камері. Такий тип широко використовується у промисловості завдяки високій продуктивності.

Переваги:

Висока продуктивність (до 1,5 т/год)

Надійність і довговічність конструкції

Менше енергоспоживання, ніж у шнекових пресів

Недоліки:

Складність регулювання щільності брикетів

Високий рівень шуму та вібрацій

Не підходить для вологої або надто волокнистої сировини

в) Гідравлічні преси

Забезпечують нижчий тиск, але працюють м'якше та з меншими витратами на обслуговування. Часто використовуються у малих виробництвах або для виготовлення нестандартних форм брикетів.

Переваги:

Менше зношування елементів

Можливість використання різної сировини

Добра адаптація до домашніх або малих промислових умов

Недоліки:

Низька продуктивність

Низька щільність брикетів (500–700 кг/м<sup>3</sup>)

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обмежена тривалість безперервної роботи

г) Ударні (ударно-механічні) преси

Забезпечують ущільнення матеріалу за рахунок динамічного удару плунжером. Такі преси мають просту конструкцію, але використовуються переважно для вугілля або деревного вугілля.

### **Вибір технології брикетування для опалого листя**

Опале листя як сировина для брикетування має кілька особливостей:

1. Висока пористість і низька щільність у природному стані
2. Високий вміст летких органічних речовин
3. Низький вміст лігніну — отже, необхідне застосування зв'язувальних речовин або попереднє термооброблення

Найбільш ефективною є технологія шнекового пресування з попереднім висушуванням листя до вологості не вище 12–15%, подрібненням до розміру <5 мм і додаванням до 5% крохмалю або глини як зв'язувальної речовини. У деяких експериментальних установках використовується також біовугілля з піролізу листя як структурно-зв'язувальний наповнювач.

### **Енергоспоживання та продуктивність**

Типові показники для різних типів пресів:

Тип преса	Потужність, кВт	Щільність брикетів, кг/м <sup>3</sup>	Продуктивність, кг/год
Шнековий	15–25	1000–1200	150–300
Механічний	20–30	900–1100	500–1500
Гідравлічний	5–10	600–800	-

Методи брикетування біомаси значно різняться за технологічною складністю, витратами та якістю готового палива. Для ефективної переробки опалого листя доцільним є використання шнекового або механічного пресування з додаванням зв'язувальних речовин. Вибір устаткування має враховувати характеристики сировини, доступність енергоресурсів та вимоги до якості кінцевого продукту.

## Вимоги до брикетів з біомаси

Узагальнені вимоги згідно з міжнародним стандартом ISO 17225-6:2021 «Тверде біопаливо – Специфікації та класи – Частина 6: НЕ деревинні брикети та пелети» для таких джерел біомаси, як опале листя, трава, агровідходи, солома тощо[7].

ISO 17225-6:2014. Класифікація та вимоги до не деревинних брикетів та пелетів.

Цей стандарт встановлює класи якості твердого біопалива, виготовленого з не деревинної сировини: листя, солома, лушпиння, трава, агровідходи.

### 1. Основні класи якості

Стандарт визначає три основні класи пелетів і брикетів із не деревинної біомаси:

Клас	Призначення
A	Побутове застосування (обмежено – через викиди і золу)
B	Комерційне використання (котельні середньої потужності)
C	Промислове використання (теплоелектростанції, ТЕЦ)

Для брикетів з опалого листя зазвичай можливе лише використання в класах B або C, через високу зольність та низьку теплоту згоряння.

### 2. Технічні характеристики за ISO 17225-6:2021[7]

Показник	Клас A	Клас B	Клас C
Вологість, % (маса)	$\leq 12$	$\leq 15$	$\leq 15$
Зольність, % (суха маса)	$\leq 4$	$\leq 7$	$\leq 10$
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	$\leq 14$	$\geq 13$	$\geq 12$
Сірка, %	$\leq 0.05$	$\leq 0.1$	$\leq 0.2$

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Азот, %	$\leq 0.3$	$\leq 0.6$	$\leq 1.0$
Хлор, %	$\leq 0.03$	$\leq 0.07$	$\leq 0.1$
Механічна міцність, %	$\geq 95$	$\geq 90$	$\geq 85$
Щільність насипна, кг/м <sup>3</sup>	$\geq 600$	$\geq 550$	$\geq 500$

Значення можуть варіюватися залежно від типу сировини (листя, солома, лушпиння), однак ці межі вважаються орієнтовними.

### 3. Вимоги до сировини

- 1) Не допускається наявність синтетичних добавок, пластику, токсичних речовин, фарб, металів.
- 2) Може містити: агрономічні залишки, траву, листя, соломку, шкаралупу, лушпиння тощо.
- 3) Допускається використання зв'язувальних речовин, таких як крохмаль, глина, вапняк – до 5% маси.

### 4. Екологічні аспекти

- 1) Брикети з листя можуть мати вищу зольність і викиди азоту та хлору, тому рекомендовані для котелень з системами очищення димових газів.
- 2) Побутове використання брикетів із листя може бути обмежене (через ризик корозії в печах, високу зольність, інтенсивне димлення).

### 5. Маркування

- Згідно з ISO 17225-6:2021[7], маркування повинно включати:
- Тип сировини (наприклад: "leaf biomass briquette", "straw pellet")
- Клас якості (А, В або С)
- Вологість, зольність, теплота згоряння
- Назва виробника
- Місце виготовлення, дата

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Брикети з опалого листя можуть відповідати ISO 17225-6:2021[7] класу В або С, залежно від фактичних характеристик.

Вони можуть бути ефективним паливом для невибагливих промислових або напівпромислових котлів, за умови правильного пресування, сушки та очищення від домішок.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

### 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1. Характеристика опалого листя як сировини

Опале листя є різновидом твердої біомаси рослинного походження, яке утворюється щорічно внаслідок природного циклу листопаду. З погляду енергетичного використання, воно класифікується як вторинна лінійна біомаса, що не конкурує з харчовими або технічними культурами й не потребує спеціального вирощування. Завдяки широкій доступності, низькій вартості та відновлюваному характеру, опале листя розглядається як перспективна сировина для отримання біопалива у вигляді брикетів або гранул.

#### Морфологічні та структурні властивості

З морфологічної точки зору, листя складається переважно з клітин паренхіми з високим вмістом целюлози, геміцелюлози та частково лігніну. Вміст основних біополімерів у листі суттєво залежить від породи деревини, стадії розкладу, ґрунтово-кліматичних умов та виду листяних дерев (липа, клен, дуб, каштан тощо). У середньому хімічний склад сухої речовини опалого листя можна подати у таких межах:

Целюлоза – 20–40%

Геміцелюлоза – 15–30%

Лігнін – 10–20%

Зола (мінеральні речовини) – 10–25%

Таким чином, опале листя має менший вміст лігніну, ніж деревина, що суттєво впливає на зв'язувальні властивості під час пресування. Лігнін є природним термопластичним полімером, що виконує функцію сполучного агента при брикетуванні деревини. Низький вміст лігніну в листі потребує додаткового введення зв'язувальних речовин, таких як крохмаль, глина або технічний лигносульфонат.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

## Енергетичні властивості

Основні енергетичні показники опалого листя (суха маса):

Показник	Значення
Вологість, % (природна)	25–40
Зольність, %	10–25
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	13,0–15,0
Щільність у пресованому стані	600–800 кг/м <sup>3</sup>
Насипна щільність (непресоване)	150–250 кг/м <sup>3</sup>

Зольність листя є значно вищою за показники деревини (0,5–2%), що є одним з основних обмежень для його використання як палива. Висока зольність зумовлена наявністю мінералів, піску, ґрунту, а також природного накопичення кальцію, кремнію, магнію, калію та інших елементів у тканинах листя.

## Екологічні особливості та безпека

Опале листя містить незначну кількість сірки та азоту, однак при термічному розкладанні в умовах неповного згоряння можуть утворюватися окисли азоту (NO<sub>x</sub>), чадний газ (CO) і органічні леткі сполуки. Тому для зменшення екологічного навантаження при спалюванні брикетів з листя доцільним є:

- використання котлів з високим ступенем допалювання газів;
- впровадження систем фільтрації золи та очищення димових газів;
- ретельна сушка сировини перед брикетуванням для підвищення ефективності горіння;
- промивання сировини перед брикетуванням.

Крім того, заборонено використовувати листя, зібране поблизу автомобільних доріг, сміттєзвалищ, підприємств, які можуть накопичувати у листовій масі важкі метали або токсичні сполуки (Zn, Pb, Cd тощо).

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## Сезонна доступність і обсяг ресурсу

Щороку в Україні утворюється сотні тисяч тонн опалого листя, яке традиційно спалюється на відкритому повітрі, що призводить до значного забруднення атмосферного повітря. За даними Держстату України та оцінками екологічних організацій[8], у середньому утворюється:

- близько 1,5–2,5 т листя з 1 га листяних насаджень;
- у містах – до 20–60 тис. тонн щороку у великих населених пунктах.

Цей ресурс може бути локальним джерелом сировини для біоенергетичних установок при мінімальних витратах на транспортування та зберігання.

### 3.2. Основи процесу брикетування

Процес брикетування біомаси є одним з ключових напрямів механічної підготовки твердих біологічних матеріалів до ефективного енергетичного використання. Брикетування дає змогу значно підвищити енергетичну щільність, зменшити обсяг сировини, полегшити транспортування і зберігання, а також забезпечити більш стабільне і контрольоване горіння у порівнянні з необробленими матеріалами, зокрема такими, як опале листя.

#### Визначення та суть процесу

Брикетування — це механічний процес стискання сипких або дрібнодисперсних матеріалів під тиском для отримання компактних форм (брикетів) із підвищеною щільністю. Основною метою брикетування біомаси є перетворення неструктурованої, гігроскопічної та об'ємної сировини на паливо з уніфікованими параметрами, придатне до зберігання, транспортування та ефективного згоряння.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Основні етапи технологічного процесу брикетування

Технологічний цикл брикетування включає низку обов'язкових підготовчих і основних етапів, що забезпечують якісний вихідний продукт:

### 1. Збір і сортування сировини.

У контексті опалого листя необхідно виключити вміст сторонніх домішок: ґрунту, каміння, пластику, металів, гілок тощо.

### 2. Сушка до оптимального рівня вологості.

Для більшості технологій брикетування бажана масова вологість сировини становить 10–15%. Вища вологість призводить до розпаду брикетів та зниження теплоти згорання.

### 3. Промивання.

Листя перед брикетуванням обов'язково треба промити водою, щоб виключити потрапляння сторонніх домішок, а саме ґрунту, каміння, пилу.

### 3. Подрібнення.

Зазвичай перед брикетуванням листя подрібнюється до фракції  $\leq 10$  мм, що забезпечує рівномірне ущільнення матеріалу.

### 4. Додавання зв'язувальних речовин (за потреби).

Через низький природний вміст лігніну (природного «клею» у деревині), у листі часто застосовуються додаткові зв'язуючі: крохмаль, лигносульфонат, глина, вапняк, ПАВ.

### 5. Брикетування під високим тиском.

Стиснення відбувається за температур і тисків, достатніх для активації зв'язування частинок. Для лігніновмісної сировини температура  $\geq 100^\circ\text{C}$  викликає пластифікацію лігніну, що забезпечує зв'язування. В листі цей ефект обмежений, тому тиск є визначальним.

### 6. Охолодження та стабілізація.

Щойно сформовані брикети мають високу температуру й можуть деформуватись. Їх необхідно охолодити до  $< 40^\circ\text{C}$ .

### 7. Фасування та зберігання.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Брикетти зберігаються в сухих умовах, захищених від вологи, яка може викликати їх розпад.

### **Фізико-хімічні механізми ущільнення**

Механізм утворення стабільного брикету базується на діях механічного тиску, температури та міжмолекулярних зв'язків. Основні типи взаємодій, які забезпечують стабільність брикетів:

- Механічне блокування (взаємне переплетення волокон);
- Капілярно-адгезійні сили (залишкова волога та плівки);
- Клейові з'єднання (за рахунок добавок);
- Термопластифікація лігніну (для деревини – неактуально для листя);
- Гідрогенні зв'язки між гідрофільними компонентами (целюлоза, геміцелюлоза).

### **Типи пресування**

Існують різні типи механічного ущільнення, які відрізняються як за конструкцією, так і за принципом дії:

Тип преса	Опис	Приклад застосування
Гідравлічний	Повільне стиснення під тиском до 300 МПа	Домашні установки
Механічний	Ексцентриковий або поршневий прес	Промислові лінії
Шнековий	Гвинтова подача з тертям і тепловиділенням	Для дрібної сировини

Вальцювий	Стиснення між обертовими вальцями	Гранулювання
-----------	-----------------------------------	--------------

Для опалого листа найбільш ефективними є механічні поршневі або шнекові преси, які здатні забезпечити необхідний тиск для ущільнення низьколігнівової сировини.

### Вимоги до сировини

Згідно з ISO 17225-6:2021[7] та ДСТУ 8358:2015[9], ефективне брикетування можливе за таких умов:

- Розмір часток – не більше 10–15 мм;
- Вологість – 8–15% (оптимально – 12%);
- Зольність – бажано <20% для запобігання шлакоутворенню;
- Однорідність сировини – без домішок (грунт, каміння, пластик);
- Наявність зв'язувальних речовин – рекомендовано.

### Переваги та обмеження брикетування листа

Переваги:

1. Використання доступної сировини (відходи, які інакше підлягали б спаленню);
2. Зменшення об'єму сировини у 3–5 разів;
3. Покращення умов транспортування;
4. Зниження локального забруднення повітря за рахунок організованого горіння;
5. Потенціал заміни частини викопного палива.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Обмеження:

1. Висока зольність → потреба у відповідному котельному обладнанні;
2. Низький вміст лігніну → додаткові витрати на зв'язуючі речовини;
3. Нерівномірність сировини залежно від породи та ступеня розкладу;
4. Сезонний характер доступності.

### 3.3. Визначення теплотворної здатності твердого палива

#### Поняття теплотворної здатності та її значення

Теплотворна здатність (теплота згоряння) є ключовим параметром, що визначає енергетичну цінність твердого палива, зокрема біопалива з опалого листя. Вона характеризує кількість теплоти, що вивільняється при повному згорянні одиниці маси палива в умовах, коли всі хімічні елементи, які входять до його складу, повністю окислюються до кінцевих продуктів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  тощо).

Існує два основних типи теплотворної здатності:

- Вища теплота згоряння ( $Q_{\text{sub}}^{\text{V}}$ ) – включає тепло, що виділяється при конденсації водяної пари, яка утворюється під час горіння.
- Нижча теплота згоряння ( $Q_{\text{sub}}^{\text{H}}$ ) – не враховує тепло, що поглинається при випаровуванні води, й краще відображає реальну енергетичну ефективність при використанні в побутових або промислових умовах.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для практичного використання у паливно-енергетичних балансах найчастіше застосовується нижча теплота згоряння ( $Q_{\text{Н}}$ ), особливо в системах, де утворена водяна пара не конденсується.

### Методики визначення теплотворної здатності

Визначення теплотворної здатності твердого біопалива регламентується низкою міжнародних і національних стандартів. Основні методики базуються на калориметричному аналізі, що проводиться в умовах повного згоряння палива в калориметричній бомбі.

Основні нормативні документи:

- ISO 18125:2017 – Solid biofuels – Determination of calorific value[10];
- ДСТУ ISO 1928:2006 – Тверде мінеральне паливо. Визначення теплоти згоряння бомбовим калориметром та розрахунок нижчої теплоти згоряння[11];
- ДСТУ ISO 18125:2019 – Біопаливо тверде. Визначення теплотворної здатності[12].

Суть методу:

1. Висушена навішка палива масою 0,5–1,0 г поміщається в бомбовий калориметр, заповнений киснем під тиском 25 атм.
2. Відбувається повне згоряння у замкнутому середовищі.
3. Вимірюється підвищення температури води, що омиває камеру згоряння.
4. На основі теплотміни й маси зразка розраховується вища теплота згоряння.
5. Нижча теплота згоряння обчислюється з урахуванням вмісту водню у паливі та кількості утвореної водяної пари за формулою:

$$Q_{\text{Н}} = Q_{\text{В}} - r \cdot (9\text{H} + \text{W})$$

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

де:

- $Q_{\text{H}}$  – нижча теплота згоряння, кДж/кг
- $Q_{\text{B}}$  – вища теплота згоряння, кДж/кг
- $r$  – питома теплота пароутворення води (2 442 кДж/кг)
- $H$  – масова частка водню в паливі, %
- $W$  – масова частка вологи у паливі, %

### **Фактори, що впливають на теплотворну здатність**

#### **1. Вологість сировини**

Підвищена вологість суттєво знижує ефективність згоряння, оскільки частина енергії витрачається на випаровування вологи. Наприклад, при збільшенні вологості з 10% до 30% теплота згоряння може знизитися на 30–50%.

#### **2. Вміст летких речовин і фіксованого вуглецю**

Чим більше фіксованого вуглецю, тим вища енергетична щільність палива. Опале листя характеризується високим вмістом летких компонентів (до 70%), що сприяє інтенсивному запаленню, але не завжди забезпечує тривале горіння.

#### **3. Зольність**

Високий вміст неорганічних залишків (золи) зменшує ефективність горіння, збільшує утворення шлаків та ускладнює експлуатацію котлів.

#### **4. Щільність брикетів**

Більш щільно стиснуті брикети мають вищу енергетичну щільність (кДж/м<sup>3</sup>) і довше горять.

### **Орієнтовні значення теплотворної здатності біопалива**

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Вид біопалива	Нижча теплота згоряння, кДж/кг	Коментар
Деревина (суха)	15 500 – 18 500	Високий вміст лігніну
Солома пшенична	14 000 – 15 500	Висока зольність
Опале листя (сухе)	12 000 – 14 500	Залежить від породи дерева
Лушпиння соняшника	16 000 – 17 000	Висока теплота згоряння
Торф	14 000 – 16 000	Часто містить домішки

### Практичне значення результатів

- Знання теплотворної здатності дозволяє:
- Порівнювати брикети з опалого листя з іншими видами палива;
- Визначати доцільність використання у різних системах опалення;
- Розраховувати енергетичні баланси при спалюванні;
- Обґрунтовувати економічну ефективність виробництва брикетів.

### 3.4. Методи оцінки екологічної безпечності при згорянні

Оцінка екологічної безпечності процесу згоряння твердого біопалива, зокрема брикетів з опалого листя, є критично важливою для визначення його придатності як альтернативного джерела енергії. Основне завдання оцінки – виявити кількісні та якісні характеристики викидів шкідливих речовин, які утворюються під час згоряння палива, та порівняти їх із чинними

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

нормативами. Це дозволяє забезпечити дотримання екологічних стандартів і зменшити негативний вплив на довкілля.

### **Основні забруднювальні компоненти продуктів згоряння**

У процесі згоряння біопалива з опалого листя можуть утворюватися такі основні групи шкідливих речовин:

- Оксиди вуглецю (CO, CO<sub>2</sub>) — продукти неповного (CO) та повного (CO<sub>2</sub>) згоряння органічної маси;
- Оксиди азоту (NO, NO<sub>2</sub>) — утворюються за високих температур за участі молекулярного азоту і кисню;
- Оксиди сірки (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>) — викиди залежать від вмісту сірки в сировині;
- Тверді частинки (PM) — зола, незгорілі органічні речовини;
- Леткі органічні сполуки (VOC) — включають альдегіди, феноли, вуглеводні;
- Поліароматичні вуглеводні (PAHs) — канцерогенні речовини, утворюються при неповному згорянні.

Рівень цих забруднень значною мірою залежить від якості сировини, вологості палива, температурного режиму горіння та типу обладнання.

### **Методи вимірювання і контролю забруднювальних речовин**

Для визначення кількісного складу викидів використовують низку інструментальних методів, що ґрунтуються на фізико-хімічних властивостях речовин. Основні з них:

1. Газоаналіз методами ІЧ-спектроскопії, хемілюмінесценції та термокондуктометрії

- Використовується для вимірювання концентрацій CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>.
- Обладнання: портативні або стаціонарні газоаналізатори (наприклад, TESTO 350, MRU NOVA Plus).
- Вимірювання проводиться в димовому каналі або після очищення газів.

2. Гравіметричний метод

- Для визначення масової концентрації твердих частинок (PM).
- Вимірювання здійснюється шляхом пропускання димових газів через фільтр з наступним зважуванням.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

- Регламентується ДСТУ ISO 9096:2012 Метрологія. Комплекси діагностичні акустико-емісійні. Методика повірки[13].

### 3. Газохроматографічний аналіз

- Дозволяє визначити вміст летких органічних сполук (VOC), поліароматичних вуглеводнів та інших мікробруднювачів.

- Використовується разом із мас-спектрометрією для точного визначення структурних формул речовин.

### 4. Спектрофотометричні методи

- Застосовуються для оцінки викидів NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, альдегідів.

- Метод базується на зміні оптичної щільності проби після реакції з хімічними реагентами.

### 5. Біоіндикація та токсикологічне тестування

- Додаткові методи оцінки екологічної безпеки – наприклад, визначення цитотоксичності водяного конденсату або диму на культурах клітин.

## Нормативне регулювання та гранично допустимі концентрації

В Україні основним нормативним документом є:

- Гранично допустимі концентрації ГДК та орієнтовні безпечні рівні діяння ОБРД забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць;

Європейські та міжнародні стандарти:

- Directive 2010/75/EU (Інтегрований контроль і запобігання забрудненню, IED);

- ISO/IEC 17025:2017 – *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* [14];

- EN 303-5:2012 – Визначає вимоги до рівнів викидів CO, NO<sub>x</sub>, PM для твердопаливних котлів.

Таблиця з ISO/IEC 17025:2017

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Речовина	ГДК (мг/м <sup>3</sup> , Україна)	Ліміт (EN 303-5, клас 5 котли)
СО (чадний газ)	5,0	≤ 500 мг/м <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	0,04	≤ 200 мг/м <sup>3</sup>
Тверді частинки РМ	0,15	≤ 40 мг/м <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	0,5	-

### Особливості згоряння брикетів з опалого листя

Брикет з опалого листя мають низку характеристик, що впливають на екологічні показники:

- Вміст азоту в листі вище, ніж у деревині, що може призводити до підвищених викидів NO<sub>x</sub>;
- У листі можуть накопичуватися мікроелементи та забрудники (важкі метали, пестициди), що при згорянні потрапляють у повітря;
- Через підвищену зольність характерні підвищені викиди дрібнодисперсного пилу (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>);
- Проте завдяки відсутності хлорвмісних компонентів практично не утворюються діоксини та фурани.

Таким чином, за правильного налаштування систем горіння (температури, повітроподачі) та очищення газів, брикет з листя можуть відповідати екологічним стандартам, особливо у малих котельнях та приватному секторі.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

## 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1. Опис конструкції установки для брикетування

Для даного дослідження була розроблена схема механічного ручного преса для брикетування. За якою буде змонтована конструкція пресу для брикет.

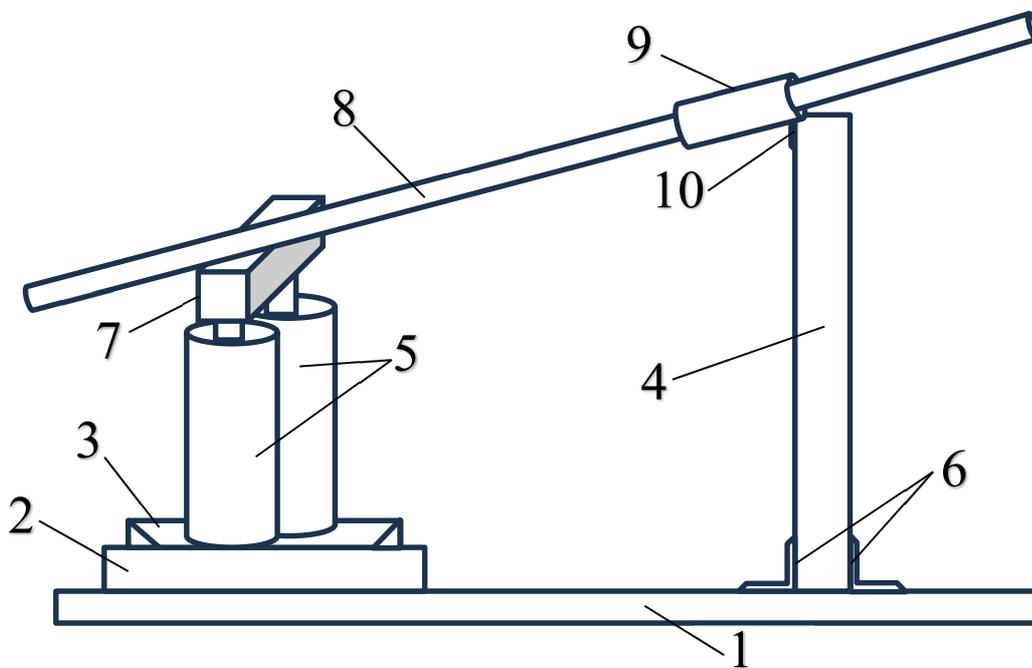


Схема механічного пресу для брикетування, де

1. Основа пресу
2. Підставка для брикет
3. Відлив для води
4. Опора для важіля
5. Форми для брикетування
6. Кутики металеві
7. Поршень
8. Важіль
9. Ковзальний елемент
10. Завіс накладний фіранковий

#### Процес монтажу ручного пресу для брикетування

Перед початком роботи треба підготувати всі матеріали, а також потрібний інструмент. Після того як весь матеріал буде закуплено/знайдено вдома можна переходити до наступного, а саме найголовнішого – це ознайомитися з правилами техніки безпеки та одягнути спеціальний одяг, а саме рукавиці, захисні окуляри та респіратор. Тільки після цього можна переходити безпосередньо до монтажу.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Монтаж ручного преса було вирішено почати з заготівлі форм для брикет. Для цього знадобиться пластикова труба діаметром 10 см та довжиною 1 м. З інструментів нам потрібен шурупокрут, маркер, ролетка, шуруп по металу та кутова шліфувальна машинка. Спочатку відпилюємо пластикову трубу на три частини: дві по 40 см та одну на 20 см ( 20 см більше не знадобиться). Потім треба розкреслити трубу на маленькі крапки. Крапки мають бути на відстані в ширину по 3 см одна від одної, а в висоту по 1,5 см.



Розкреслена для подальшого свердління форма для брикет

Опісля по розкресленим крапкам треба просвердлити дірки. Для цього треба взяти шурупокрут з шурупом по металу та почати просвердлювати.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Процес свердління дірок для відводу води

Всього вийшло 7 рядів та 13 стовбців дірок. Це 91 дірка. Цього має вистачити для відведення води, щоб в брикетах не збиралася вода. Загалом треба просверлювати близько ста дірок для гарної роботи преса. Бо якщо їх буде недостатньо, то вода не зможе виходити до кінця з брикет і вони не будуть такі міцними та і матимуть вищу вологість.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33



Готова форма для брикет

Наступним кроком буде підготовка дерев'яних деталей. Було розпиляно брус на дві частини: 5 см на 5 см на 30 см та 1,2 м. Також розпиляно менший брусочок діаметром 4 см на дві рівні частини по 40 см кожна.

					401HT-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34



Підготовка дерев'яних деталей

Тепер можна перейти до зборки поршня. Для цього потрібно два бруска по 40 см та діаметром 4 см, дві пластмасові пластини діаметром 9,5 см (її можна зробити з двох каналізаційних заглушок, накресливши коло 9,5 см діаметром та зрізавши зайве), брусок 5 см на 5 см на 30 см та 4 шурупи по дереву. Було змонтовано за схемою преса, поршень за допомогою шурупокрута.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35



Поршень до пресу

Після цього прикріплюємо опору для важіля до основи пресу. Основою може бути будь-яка дошка не менша за параметри 1 м на 30 см. Опора кріпиться до основи двома кріпильними кутиками та 4 шурупів по дереву з обох боків.

Потім кріпимо до верху опори накладну завісу фіранкову двома шурупами по дереву. Після цього на завісу прикручується ковзальний елемент ( труба діаметром 5 см та довжиною не більше 20 см) на два шурупи по дереву.

Коли всі деталі конструкції готові можна переходити до повного її монтажу. Спочатку кладемо на основу підставку для брикет – це може бути будь-який матеріал, головне щоб він був стійким та не менше 40 см на 40 см. Далі встановлюємо відливи води на підставку. Відлив має бути з нержавіючої сталі або будь-якого металу для гарного стоку води. Потім ставимо форми для брикет та поміщаємо в них поршні. І останнє, вставляємо в ковзаючий елемент важіль. Важелем може бути навіть держак від сільсько-

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

господарського інвентаря. Головне, щоб він мав діаметр менший за ковзаючий елемент. В досліді це 4 см. Завдяки ковзаючому елементу, важіль не вмонтований до всієї конструкції, тому це дає змогу менше витратити свою силу, але створювати більший тиск.



Готовий ручний прес

Даний механічний прес ідеально підійде для побутового вжитку.

Переваги даного механічного пресу:

- Відсутнє енергоспоживання
- Надійність і довговічність конструкції
- Відсутній шум та вібрації
- Підходить для будь-якої біомаси
- Добра адаптація до домашніх або малих промислових умов
- Малогабаритний
- Легка конструкція
- Бюджетний

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

- Безпечні для непрофесійного користувача – не потребують спеціальної підготовки чи дозволів

Ключові переваги домашнього пресу:

<b>Критерій</b>	<b>Домашній ручний/механічний прес</b>
Розміри	До 1 м <sup>2</sup>
Сировина	Листя, трава, тирса
Вартість	1 000 – 8 000 грн
Енергоспоживання	Відсутнє
Обслуговування	Простіше за промислові

#### **4.2. Підготовка сировини: подрібнення, промивка, вибір сполучних речовин**

Підготовка сировини — один із ключових етапів у процесі виготовлення брикетів із біомаси. Її якісне виконання значною мірою впливає на кінцеві параметри брикетів, зокрема їхню щільність, міцність, теплотворну здатність і екологічну безпечність. У випадку використання опалого листя як основної сировини, важливими аспектами є ретельне подрібнення, промивання та інколи висушування до оптимальної вологості, а також додавання сполучних речовин, які покращують зв'язувальні властивості.

##### **Подрібнення сировини**

Подрібнення є обов'язковим для досягнення однорідної структури матеріалу, що сприяє:

- збільшенню контактної площі між частинками;
- покращенню формування брикетів у матриці;
- рівномірному розподілу тепла під час горіння.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Для подрібнення опалого листя використовують:

- **Побутові або промислові подрібнювачі** (шредери, подрібнювачі гілок);
- **Барабанні та дискові дробарки**, якщо планується переробка великих обсягів.
- **Подрібнюють вручну або перебивають будівельним міксером**

Оптимальна довжина частинок після подрібнення — 2–10 мм, що дозволяє забезпечити належне ущільнення під час пресування без утворення пустот або тріщин у брикетах.

### **Промивання сировини**

В першу чергу листя необхідно ретельно промити, щоб вони були напівзанурені в воду. Після чого листя відкидають на сито, і пісок і інші сторонні домішки відсіваються через нього. Після першого подрібнення і промивання листя ще раз подрібнюють та промивають. Таким чином, з біомаси вимивається до 90% з'єднань калію і хлору і до половини вмісту сірки і азоту. Це забезпечує зниження зольності біомаси з листя і трави.

### **Вибір і застосування сполучних речовин**

Опале листя не завжди має достатні природні зв'язувальні властивості (як, наприклад, деревина, що містить лігнін). Тому для досягнення належної міцності брикетів доцільно додавати сполучні речовини, які забезпечують злипання частинок між собою при стисканні.

### **Найбільш поширені типи сполучних речовин:**

<b>Тип сполучної речовини</b>	<b>Приклади</b>	<b>Дозування (мас.%)</b>	<b>Переваги</b>
Органічні (біорозкладні)	Крохмаль, борошно, патока, картон	5–10%	Доступність, екологічність
Природні полімери	Глина, глинисті ґрунти	5–15%	Покращують форму, знижують вартість

Синтетичні полімери	Полівінілацетат (ПВА), смоли	2–5%	Висока міцність, але дорогі
---------------------	------------------------------	------	-----------------------------

Вибір сполучної речовини залежить від таких факторів:

- призначення брикету (побутове, промислове);
- екологічні вимоги;
- доступність матеріалів;
- вартість виробництва.

У домашніх умовах оптимальними є борошно, крохмаль, картон або папір, оскільки вони нетоксичні, дешеві та ефективні при низьких температурах формування. При використанні глини як сполучного необхідно враховувати її вплив на підвищення зольності брикету.

### 4.3. Рецептури брикетів: порівняння різних складів

Процес формування брикетів із біомаси, зокрема опалого листя, безпосередньо залежить від правильно підбраного складу сировинної суміші. Рецептура визначає фізико-механічні властивості готових брикетів: щільність, міцність, теплотворну здатність, зольність та стабільність при зберіганні. При використанні листя як основної біомаси особливу увагу слід приділити балансуванню структури шляхом додавання сполучних речовин і компонентів із вищою теплотворною здатністю.

#### Основні компоненти рецептур

Базовими складовими рецептури брикетів є:

- Опале листя – основна сировина з високою доступністю, однак середньою енергетичною цінністю та підвищеною зольністю;
- Сполучні речовини – покращують механічну стабільність брикетів (борошно, крохмаль, глина тощо);
- Підсилювачі теплотворної здатності – деревинна тирса, солома, торф, лушпиння соняшника, які дозволяють підвищити калорійність;

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Волога – її кількість критично важлива (для деяких видів брикетів) процесу формування та спікання, оптимальний рівень – 10–15%.

### Типові рецептури та порівняння

№	Склад рецептури (мас. %)	Щільність (кг/м <sup>3</sup> )	Теплотвор на здатність (МДж/кг)	Зольність (%)	Стійкість
1	Листя (100%)	600–700	11,0–12,2	7–9	Низька
2	Листя (80%) + тирса (15%) + крохмаль (5%)	750–850	14,0–15,2	4–5	Висока
3	Листя (70%) + солома (20%) + борошно (10%)	720–800	13,5–14,5	5–6	Висока
4	Листя (85%) + глина (10%) + патока (5%)	700–780	12,0–13,0	8–10	Середня
5	Листя (60%) + тирса (30%) + лушпиння соняшника (10%)	800–900	15,5–16,5	4–6	Висока

- Рецептūra 1 – найбільш проста, але малоефективна. Брикети легко кришаться, мають високу зольність, утворюють багато диму при згорянні.
- Рецептūra 2 – оптимальна для побутового використання, має гарну міцність, високу теплотворну здатність.
- Рецептūra 3 – добре підходить для регіонів з надлишком соломи; борошно як зв'язуюче добре виконує свою функцію.
- Рецептūra 4 – підвищена зольність через використання глини; придатна для виробництва дешевих брикетів з мінімальними затратами.
- Рецептūra 5 – найвища теплова ефективність серед розглянутих, але потребує ретельного перемішування та сушіння.

### **Вибір рецептури залежно від умов**

Вибір оптимальної рецептури залежить від:

- **Наявності сировини** (відходи деревини, агровідходи, вартість зв'язуючих);
- **Призначення брикетів** (опалення приватного будинку, котельні, промислові потреби);
- **Обладнання для пресування** (залежність від вологості та в'язкості);
- **Вимог до екологічної безпеки** – брикети з глини та листя можуть мати вищу зольність і викиди.

### **Узагальнені рекомендації**

1. **Оптимальна масова частка листя** в рецептурі – **60–80%**. Більша кількість знижує якість брикету.
2. **Зв'язуючі речовини** варто використовувати у межах **5–10%** для забезпечення міцності.
3. **Підсилювачі калорійності** (тирса, лушпиння, солома) покращують енергетичні характеристики.
4. Для домашнього використання доцільно обирати рецептури без синтетичних добавок, орієнтуючись на екологічно чисті компоненти.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

#### 4.4. Виготовлення пробних зразків

У цьому дослідженні було взято за основу брикети з опалого листя. А саме, двох рецептів. Перший, з листям та зв'язуючою речовиною, а другий з листям, тирсою та зв'язуючою речовиною.

Листя було взято з під вишні; зв'язуючою речовиною було обрано картон, бо він найрозповсюджений в побуті; тирса взята з горіху фракцією до 1 см.

Процес приготування брикетів починається з підготовки компонентів. Листя мілко подрібнюється. Спочатку вручну, а згодом було використано будівельний міксер.



Подрібнене листя вишні

Також заготовлюється тирса. Вона має бути суха та без сторонніх домішок.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43



Суша, чиста тирса

Зв'язуючою речовиною для дослідження було обрано картон. Тому що він поширений і доступний. Але перед тим як додавати його до загальної біомаси його треба підготувати. Для цього його треба подрібнити. Можна вручну. Потім залити його водою та дати настоятися мінімум 1 годину. За цей час він розкисне і його можна буде перемішати будівельним міксером, щоб вийшла більш-менш однорідна маса. Після цього треба злити зайву воду у посудину. Вона ще знадобиться для подальшого створення брикетів. Готова зв'язуюча речовина буде мати липку консистенцію та нагадувати густий клей з грудочками.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



Зв'язуюча речовина – картон

Коли всі компоненти підготовлені, то можна починати змішувати. Як було сказано вище, дослід проводитиметься за двома рецептами брикетів.

Перший – це листя (75%) + зв'язуюча речовина картон (25%).

Рецепт:

- 1 ковшик води = 2 л
- 3 ковшика листя = 1,7 кг
- 1 ковшик картону = 2 кг

Виходить доволі дивна суміш подрібненого листя, яке склеюється між собою картоном.



З такого заміса виходить 4 штуки брикетів по ~5 см в висоту та 9,5 см в діаметрі.



Готові брикети з опалого листя

Другий – це листя (60%) + зв'язуюча речовина картон (20%) + тирса (20%)

Рецепт:

- 1 ковшик води = 2 л
- 3 ковшика листя = 1,7 кг
- 1 ковшик картону = 2 кг
- 1 ковшик тирси = 560 г

З такого заміса виходить 4 штуки брикетів по ~5,5 см в висоту та 9,5 см в діаметрі.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Після повного висихання брикетів. Було проведено дослід на вологість за допомогою вологоміра.



Вологомір

Вологість брикетів:

З листям, зв'язуючою речовиною та тирсою:

A. 8,4%, 8,2%. 6,9%  $\approx$  7,8%

B. 9,8% 9,7%. 8,2%  $\approx$  9,2%

C. 10,9%, 10,8%, 9,1%  $\approx$  10,3%

D. 11,6%. 11,5% 9,8%  $\approx$  11,0%

$7,8\% + 9,2\% + 10,3\% + 11,0\% \approx 9,5\%$  - середня вологість брикетів

З листям та зв'язуючою речовиною:

A. 7,1%. 9,1%. 6,3%  $\approx$  7,5%

B. 8,6%. 10,5%. 7,5%  $\approx$  8,8%

C. 9,5%. 11,8%. 8,4%  $\approx$  9,9%

D. 10,4%. 12,3%. 9,5%  $\approx$  10,7%

$7,5\% + 8,8\% + 9,9\% + 10,7\% \approx 9,2\%$  - середня вологість брикетів

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

З цього можемо зробити висновок, що вологість брикетів з листям та брикетів з листям та тирсою майже однакова. Також результати дослідження засвідчили, що середній вміст вологи у брикетах обох типів не перевищує критичну межу, рекомендовану для якісного брикетованого біопалива. Згідно з вимогами, оптимальна вологість для твердого біопалива повинна становити не більше 10–12%.

Таким чином:

- Брикети 1 (9,5%) та Брикети 2 (9,2%) відповідають нормативним вимогам щодо вологості;
- Різниця у вологості між зразками є незначною (0,3%) і не є критичною з точки зору впливу на процес горіння чи зберігання;
- Обидва зразки демонструють добрий рівень попередньої сушки сировини, що свідчить про належну підготовку на етапі виробництва.

Таким чином, обидва типи брикетів можна вважати високоякісними за показником вологості, що забезпечує ефективне горіння, мінімізацію димових викидів і зниження втрат енергії на випаровування вологи. Брикети з листя мають дещо кращий показник, що може свідчити про трохи ефективнішу сушку або меншу гігроскопічність рецептурного складу.

#### 4.5. Визначення теплотворної здатності зразків

Теплотворна здатність (нижча і вища) є одним з головних параметрів, що визначає якість твердого біопалива. Вона характеризує кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні одиниці маси палива, і безпосередньо впливає на ефективність його застосування для опалення. Для біопалива на основі опалого листя цей показник залежить від таких факторів, як вологість, зольність, наявність домішок, щільність та структура рецептури.

#### Методика вимірювання

Для визначення теплотворної здатності зразків брикетів було використано калориметричний метод з використанням лабораторної калориметричної бомби. Методика базується на принципі вимірювання тепла, що виділяється при повному згорянні зразка в контрольованих умовах.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



Калориметрична бомба

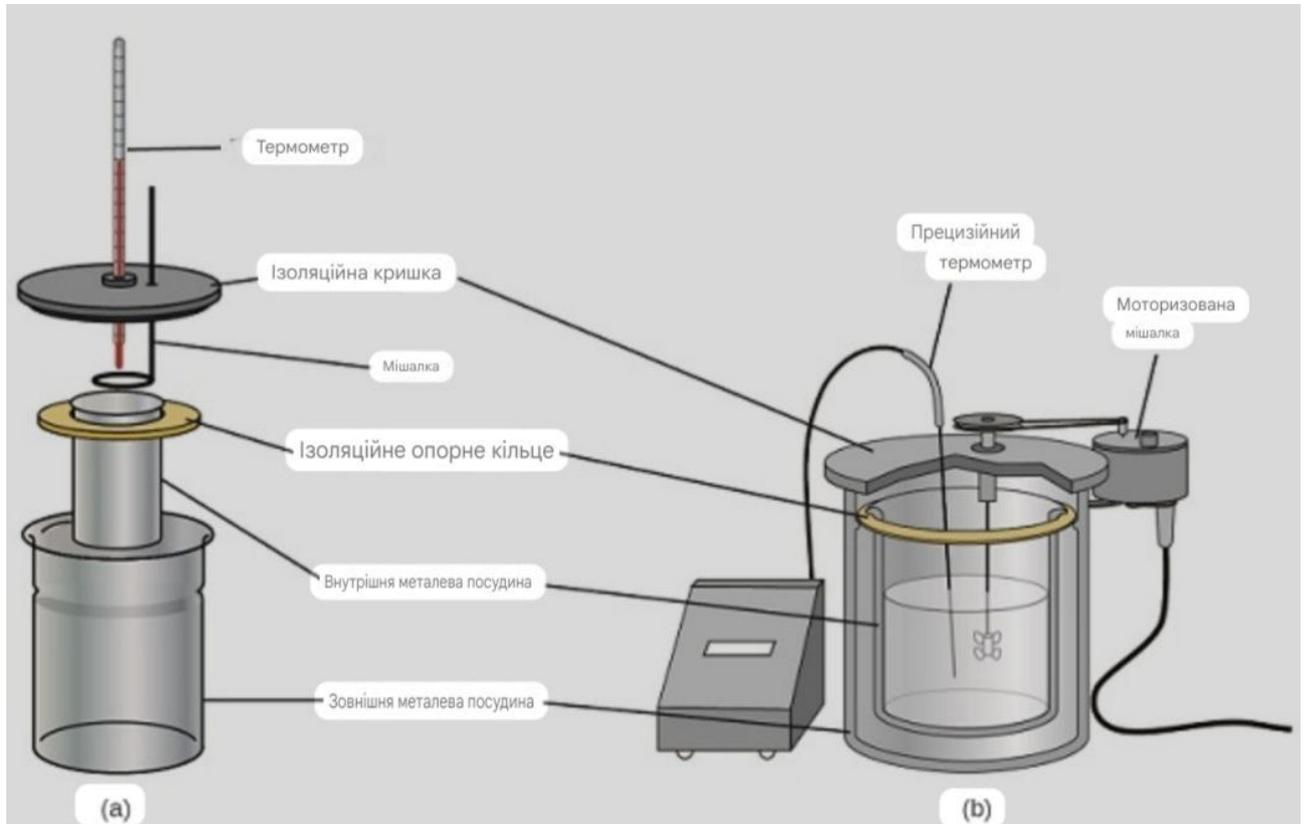


Схема калориметричної бомби [15]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

401НТ-№9475971-ДП

Арк.

49

**Порядок проведення дослідження:**

1. Підготовка зразків: брикети були попередньо висушені до постійної маси.
2. Подрібнення зразків на кавомолці.



3. Пресування зразку в таблетку з мідним дротом 10 см.



					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

4. Точне зважування таблетки.
5. Вимірювання маси води в калориметричній бомбі.
6. Вимір початкової температури води в калориметричній бомбі.
7. Вимір температури в приміщенні.
8. Фіксування таблетки за допомогою мідного дроту.
9. Перевірка струму мультиметром.
10. Подання кисню та іскри.
11. Згоряння зразків у бомбовому калориметрі у середовищі чистого кисню при тиску 20 атм.
12. Вимірювання температурного ефекту.



Скачок температури при горінні

13. Вимірювання вологості при згоранні зразку.
- 14.. Розрахунок теплотворної здатності.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

**Проведення досліду №1 (брикети з листя + зв'язуюча речовина картон):**

Підготовка до досліду та визначення потрібних параметрів.

Вихідні параметри:

- Маса таблетки – 1,13 г
- Маса води – 2495 г
- Зовнішня температура повітря – 21,9 °С
- Тиск – 20 атм
- Маса 10 см мідного дроту (згорів) – 0,0288 г

Щоб знайти потрібну нам питому теплоємність, потрібно масу даної речовини помножити на її питому теплоємність.

$$c = m \cdot c \text{ (речовини),}$$

де  $c$  – питома теплоємність;

$m$  – маса речовини;

$c$  – питома теплоємність речовини.

Таблиця розрахунків питомої теплоємності:

Речовина	Маса, кг	Питома теплоємність, Дж/(кг·°С)	Питома теплоємність, Дж/(кг·°С) (на масу речовини)
Вода	2,495	4187	10446,6
Нержавіюча сталь (бомба)	1,82	460	837,2
Гумова прокладка (бомба)	0,005	1380	6,9
Частина мішалки (латунь)	0,12	377	45,2
Циліндр (латунь)	0,543	377	204,7
Чашка нержавіюча	0,00902	460	4,1
Кисень (20 атм)	0,007675	920	7,1
<b>Загальна:</b>			<b>11551,8</b>

Далі, щоб обчислити кількість теплоти при згоранні треба скористатися формулою:

$$Q = c \cdot m(t_2 - t_1), \text{ Дж}$$

де  $Q$  – кількість теплоти при згоранні;

$c$  – питома теплоємність;

$m$  – маса речовини;

$t_2, t_1$  – температури при горінні.

Приклад обрахунку:

$$Q = 20793,28761 \cdot 11551,8 \cdot (3,26 - 3,25) = 20908,80587 \text{ Дж}$$

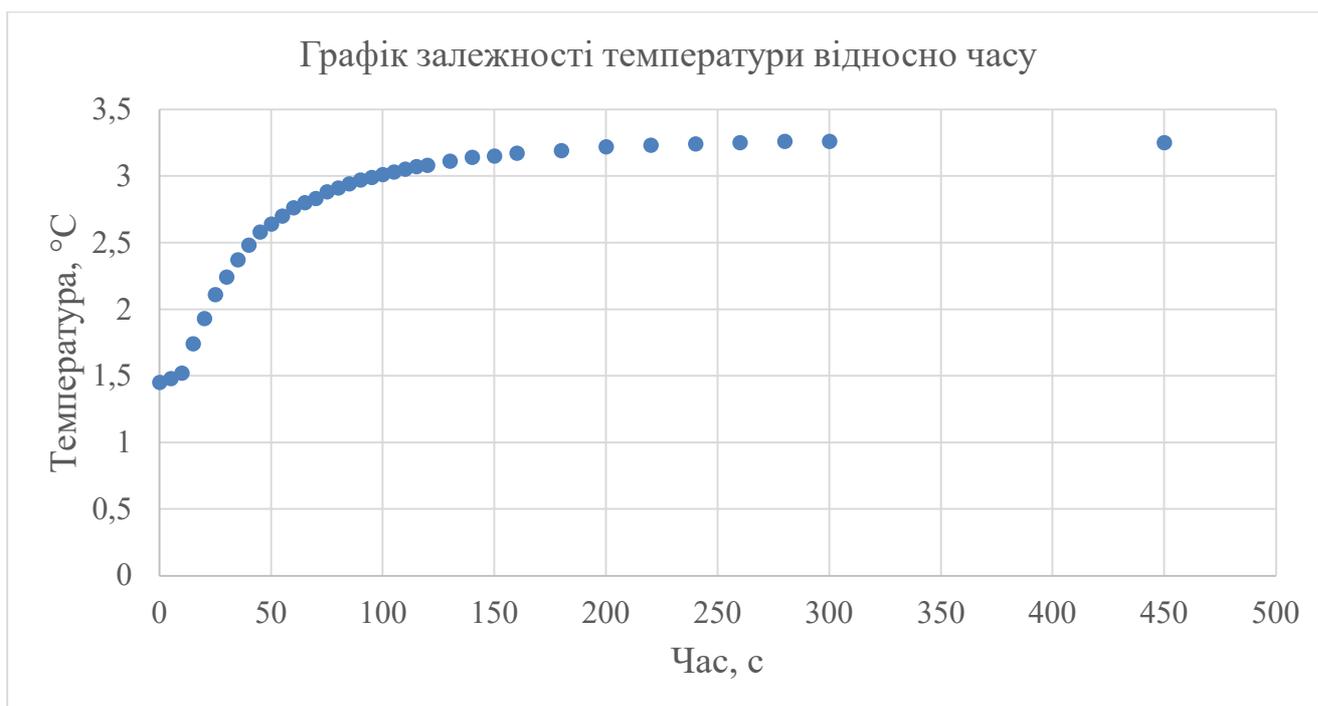
Таблиця фіксації даних часу відносно виділення теплоти

Час			Час	Температура	Кількість теплоти при згорянні, $Q$
Хв	Сек	Різниця, сек	Сек	°C	Дж
0	0	0	0	1,45	0
0	5	5	5	1,48	346,5547934
0	10	5	10	1,52	808,6278514
0	15	5	15	1,74	3350,02967
0	20	5	20	1,93	5544,876695
0	25	5	25	2,11	7624,205456
0	30	5	30	2,24	9125,942894
0	35	5	35	2,37	10627,68033
0	40	5	40	2,48	11898,38124
0	45	5	45	2,58	13053,56389
0	50	5	50	2,64	13746,67347
0	55	5	55	2,7	14439,78306
1	0	5	60	2,76	15132,89265
1	5	5	65	2,8	15594,96571
1	10	5	70	2,83	15941,5205
1	15	5	75	2,88	16519,11182
1	20	5	80	2,91	16865,66661
1	25	5	85	2,94	17212,22141
1	30	5	90	2,97	17558,7762
1	35	5	95	2,99	17789,81273
1	40	5	100	3,01	18020,84926
1	45	5	105	3,03	18251,88579
1	50	5	110	3,05	18482,92232
1	55	5	115	3,07	18713,95885
2	0	5	120	3,08	18829,47711
2	10	10	130	3,11	19176,0319
2	20	10	140	3,14	19522,5867
2	30	10	150	3,15	19638,10496

2	40	10	160	3,17	19869,14149
3	0	20	180	3,19	20100,17802
3	20	20	200	3,22	20446,73281
3	40	20	220	3,23	20562,25108
4	0	20	240	3,24	20677,76934
4	20	20	260	3,25	20793,28761
4	40	20	280	3,26	20908,80587
5	0	20	300	3,26	<b>20908,80587</b>
7	30	150	450	3,25	20793,28761

Початкова температура в калориметричній бомбі становила – 1,45 °С. Найвища точка температури становить – 3,26 °С. З цього виходить, що температура піднялася за час горіння на 1,81 °С. При цьому виділивши теплоти згорання – 20908,80587 Дж.

Температура піднялася до найвищої точки за 5 хв рівно та почала знижуватися аж на 7 хвилині 30 секунд.



На графіку чудово продемонстровано, що температура почала різко підійматися в перші десять секунд після початку горіння. А призупинилася швидко зростати вже на 50-ти секундах та почала повільно рости вгору. Також бачимо, що вона майже не росте починаючи з 150 секунд або 2-ох хвилин 30-ти секунд.

Температура перестала змінюватися на 5-тій хвилині та поки не почала знижуватися аж через дві хвилини тридцять секунд.

Далі обчислюємо питому теплоту згорання. Для цього потрібна формула:

$$dQ_{втр} = A \cdot dt \cdot dZ, \text{ Дж}$$

або

$$dQ_i = 0,39 \cdot (dt_0 + (t_{i-1} + t_i)/2) \cdot dZ, \text{ Дж}$$

$dt_0$  обчислюється за даною формолою:

$$dt_0 = t_{0\text{Бекменна}} - t_{\text{навкл}} = 21,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Приклад розв'язання:

$$dQ_i = 0,39 \cdot (21,55 + (1,52 + 1,74)/2) \cdot 5 = 2,496 \text{ Дж}$$

Таблиця розрахунків питомої теплоти згорання

	$t_{nc}$	$dt = dt_0 + ((t_{i-1} + t_i)/2)$	$dZ$	Дж
$dQ_i =$	21,9	1,115	5	2,17425
$dQ_i =$	21,9	1,15	5	2,2425
$dQ_i =$	21,9	1,28	5	2,496
$dQ_i =$	21,9	1,485	5	2,89575
$dQ_i =$	21,9	1,67	5	3,2565
$dQ_i =$	21,9	1,825	5	3,55875
$dQ_i =$	21,9	1,955	5	3,81225
$dQ_i =$	21,9	2,075	5	4,04625
$dQ_i =$	21,9	2,18	5	4,251
$dQ_i =$	21,9	2,26	5	4,407
$dQ_i =$	21,9	2,32	5	4,524
$dQ_i =$	21,9	2,38	5	4,641
$dQ_i =$	21,9	2,43	5	4,7385
$dQ_i =$	21,9	2,465	5	4,80675
$dQ_i =$	21,9	2,505	5	4,88475
$dQ_i =$	21,9	2,545	5	4,96275
$dQ_i =$	21,9	2,575	5	5,02125
$dQ_i =$	21,9	2,605	5	5,07975
$dQ_i =$	21,9	2,63	5	5,1285
$dQ_i =$	21,9	2,65	5	5,1675
$dQ_i =$	21,9	2,67	5	5,2065
$dQ_i =$	21,9	2,69	5	5,2455
$dQ_i =$	21,9	2,71	5	5,2845
$dQ_i =$	21,9	2,725	5	5,31375
$dQ_i =$	21,9	2,745	10	10,7055
$dQ_i =$	21,9	2,775	10	10,8225

<b>dQi =</b>	21,9	2,795	10	10,9005
<b>dQi =</b>	21,9	2,81	10	10,959
<b>dQi =</b>	21,9	2,83	20	22,074
<b>dQi =</b>	21,9	2,855	20	22,269
<b>dQi =</b>	21,9	2,875	20	22,425
<b>dQi =</b>	21,9	2,885	20	22,503
<b>dQi =</b>	21,9	2,895	20	22,581
<b>dQi =</b>	21,9	2,905	20	22,659
<b>Сума dQi =</b>				<b>258,38475</b>

Загальна теплота згоряння обчислюється за формулою:

$$Q_{згл} = Q_{кіл} + dQ_{ісум} = 21167,19062 \text{ Дж}$$

Віднімаємо теплоту горіння міді:

$$Q_{згл.в} = Q_{згл} - 73 \text{ Дж} = 21167,19062 \text{ Дж} - 73 \text{ Дж} = 21094,19062 \text{ Дж},$$

Де  $q_{Cu} = (dH/M_{Cu}) \cdot m_{дроту} = 0,073416$  або 73 Дж.

де  $dH$  - теплота горіння міді кристалічної, яка дорівнює - 162 кДж/моль

$M_{Cu}$  - молярна маса  $Cu$ , яка дорівнює 63,55 г/моль

$m_{дроту}$  - маса мідного дроту (згорівшого), яка дорівнює 0,0288 г

Тепер можемо обчислити вищу теплоту згоряння за формулою:

$$Q_{в} = Q_{згл.в} / m_{табл} = 18,667 \text{ МДж /кг}$$

Щоб знайти нижчу теплоту згорання, спочатку потрібно дізнатися теплоту конденсації водяної пари, яка виділилася під час згорання зразку таблетки. Для цього потрібно швидко після досліду зібрати кухонною губкою весь конденсат з калориметричної бомби.

Маса губки = 1,62 г.

Маса губки з конденсатом = 2,05 г.

Тоді маса конденсату води = 2,05 – 1,62 = 0,44 г.

Теплота конденсації води = 1891 кДж/кг за таблицею з [16].

Теплота конденсації водяної пари:

$$Q_{квп} = \frac{1891 \times 0,44}{1000} = 0,83204 \text{ кДж}$$

Нижча теплота згоряння розраховується за формулою:

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$Q_H = \frac{Q_{\text{згл.в}} - Q_{\text{квп}}}{m_{\text{табл}}}, \text{МДж/ кг}$$

$$Q_H = \frac{21094,19062 - 0,83204}{0,00113} = 17,931 \text{ МДж/ кг}$$

**Проведення дослідів №2 (брикети з листя + тирси + зв'язуюча речовина картон):**

Підготовка до дослідів та визначення потрібних параметрів.

Вихідні параметри:

- Маса таблетки – 0,93 г
- Маса води – 2510 г
- Зовнішня температура повітря – 21,9 °С
- Тиск – 20 атм
- Маса 10 см мідного дроту (згорів) – 0,0288 г

Так як і в першому досліді, щоб знайти потрібну нам питому теплоємність, потрібно масу даної речовини помножити на її питому теплоємність.

$$c = m \cdot c \text{ (речовини)},$$

де  $c$  – питома теплоємність;

$m$  – маса речовини;

$c$  – питома теплоємність речовини.

Таблиця розрахунків питомої теплоємності

Речовина	Маса, кг	Питома теплоємність, Дж/(кг·°С)	Питома теплоємність, Дж/(кг·°С) (на масу речовини)
Вода	2,51	4187	10509,4
Нержавіюча сталь (бомба)	1,82	460	837,2
Гумова прокладка (бомба)	0,005	1380	6,9
Частина мішалки (латунь)	0,12	377	45,2

Циліндр (латунь)	0,543	377	204,7
Чашка нержавіюча	0,00902	460	4,1
Кисень (20 атм)	0,007675	920	7,1
Загальна:			11614,6

Далі, щоб обчислити кількість теплоти при згоранні треба скористатися формулою:

$$Q = c \cdot m(t_2 - t_1), \text{ Дж}$$

де Q – кількість теплоти при згоранні;

c – питома теплоємність;

m – маса речовини;

t<sub>2</sub>, t<sub>1</sub> – температури при горінні.

Приклад обрахунку:

$$Q = 13821,41 \cdot 11614,6 \cdot (1,23 - 1,19) = 14286 \text{ Дж}$$

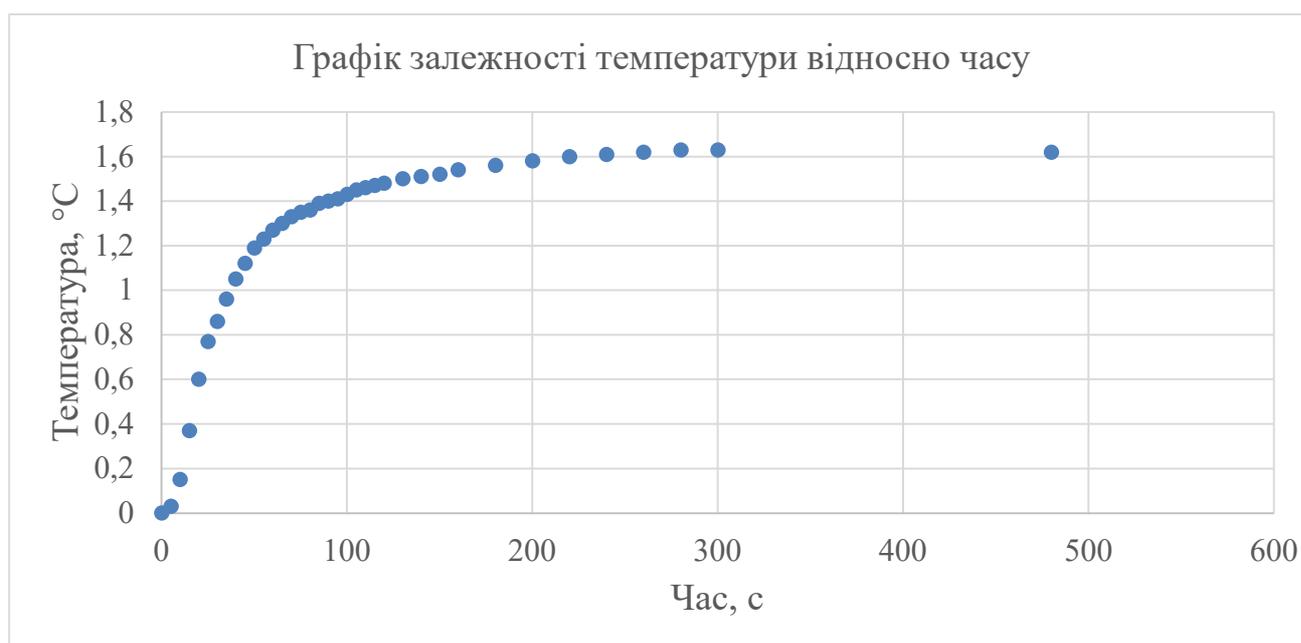
Таблиця фіксації даних часу відносно виділення теплоти

Час			Час	Температура	Кількість теплоти при згорянні, Q
Хв	Сек	Різниця, сек	Сек	°C	Дж
0	0	0	0	0	0
0	5	5	5	0,03	348,4389
0	10	5	10	0,15	1742,195
0	15	5	15	0,37	4297,414
0	20	5	20	0,6	6968,779
0	25	5	25	0,77	8943,266
0	30	5	30	0,86	9988,583
0	35	5	35	0,96	11150,05
0	40	5	40	1,05	12195,36
0	45	5	45	1,12	13008,39
0	50	5	50	1,19	13821,41
0	55	5	55	1,23	14286
1	0	5	60	1,27	14750,58
1	5	5	65	1,3	15099,02
1	10	5	70	1,33	15447,46
1	15	5	75	1,35	15679,75
1	20	5	80	1,36	15795,9
1	25	5	85	1,39	16144,34

1	30	5	90	1,4	16260,48
1	35	5	95	1,41	16376,63
1	40	5	100	1,43	16608,92
1	45	5	105	1,45	16841,22
1	50	5	110	1,46	16957,36
1	55	5	115	1,47	17073,51
2	0	5	120	1,48	17189,65
2	10	10	130	1,5	17421,95
2	20	10	140	1,51	17538,09
2	30	10	150	1,52	17654,24
2	40	10	160	1,54	17886,53
3	0	20	180	1,56	18118,83
3	20	20	200	1,58	18351,12
3	40	20	220	1,6	18583,41
4	0	20	240	1,61	18699,56
4	20	20	260	1,62	18815,7
4	40	20	280	1,63	18931,85
5	0	20	300	1,63	<b>18931,8</b>
8	0	180	480	1,62	18815,7

Початкова температура в калориметричній бомбі становила – 0 °С. Найвища точка температури становить – 1,63 °С. З цього виходить, що температура піднялася за час горіння на 1,63 °С. При цьому виділивши теплоти згорання – 18931,8 Дж.

Температура піднялася до найвищої точки за 4 хв 40 с та почала знижуватися аж на 8 хвилині.



На графіку чудово продемонстровано, що температура почала різко підійматися в перші десять секунд після початку горіння. А призупинилася швидко зростати вже на 60-ти секундах та почала повільно рости вгору. Також бачимо, що вона майже не росте починаючи з 180 секунд або 3-ох хвилин.

Температура перестала змінюватися на 4-тій хвилині 40 секунд та поки не почала знижуватися аж через три хвилини двадцять секунд.

Далі обчислюємо питому теплоту згорання. Для цього потрібна формула:

$$dQ_{втр} = A \cdot dt \cdot dZ, \text{ Дж}$$

або

$$dQ_i = 0,39 \cdot (dt_0 + (t_{i-1} + t_i)/2) \cdot dZ, \text{ Дж}$$

$dt_0$  обчислюється за даною формулою:

$$dt_0 = t_{0\text{Бекменна}} - t_{\text{навкл}} = 21,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Приклад розв'язання:

$$dQ_i = 0,39 \cdot (21,55 + (1,52 + 1,74)/2) \cdot 5 = 2,496 \text{ Дж}$$

Таблиця розрахунків питомої теплоти згорання

	$t_{nc}$	$dt = dt_0 + ((t_{i-1} + t_i)/2)$	$dZ$	Дж
$dQ_i =$	21,9	-0,335	5	-0,65325
$dQ_i =$	21,9	-0,26	5	-0,507
$dQ_i =$	21,9	-0,09	5	-0,1755
$dQ_i =$	21,9	0,135	5	0,26325
$dQ_i =$	21,9	0,335	5	0,65325
$dQ_i =$	21,9	0,465	5	0,90675
$dQ_i =$	21,9	0,56	5	1,092
$dQ_i =$	21,9	0,655	5	1,27725
$dQ_i =$	21,9	0,735	5	1,43325
$dQ_i =$	21,9	0,805	5	1,56975
$dQ_i =$	21,9	0,86	5	1,677
$dQ_i =$	21,9	0,9	5	1,755
$dQ_i =$	21,9	0,935	5	1,82325
$dQ_i =$	21,9	0,965	5	1,88175
$dQ_i =$	21,9	0,99	5	1,9305
$dQ_i =$	21,9	1,005	5	1,95975
$dQ_i =$	21,9	1,025	5	1,99875
$dQ_i =$	21,9	1,045	5	2,03775
$dQ_i =$	21,9	1,055	5	2,05725
$dQ_i =$	21,9	1,07	5	2,0865

dQi =	21,9	1,09	5	2,1255
dQi =	21,9	1,105	5	2,15475
dQi =	21,9	1,115	5	2,17425
dQi =	21,9	1,125	5	2,19375
dQi =	21,9	1,14	10	4,446
dQi =	21,9	1,155	10	4,5045
dQi =	21,9	1,165	10	4,5435
dQi =	21,9	1,18	10	4,602
dQi =	21,9	1,2	20	9,36
dQi =	21,9	1,22	20	9,516
dQi =	21,9	1,24	20	9,672
dQi =	21,9	1,255	20	9,789
dQi =	21,9	1,265	20	9,867
dQi =	21,9	1,275	20	9,945
<b>Сума = dQi</b>				<b>100,0155</b>

Загальна теплота згоряння обчислюється за формулою:

$$Q_{згл} = Q_{кіл} + dQ_{ісум} = 19031,86476 \text{ Дж}$$

Віднімаємо теплоту горіння міді:

$$Q_{згл.в} = Q_{згл} - 73 \text{ Дж} = 19031,86476 \text{ Дж} - 73 \text{ Дж} = 18958,86476 \text{ Дж},$$

Де  $q_{Cu} = (dH/M_{Cu}) \cdot m_{дроту} = 0,073416$  або 73 Дж.

де  $dH$  - теплота горіння міді кристалічної, яка дорівнює - 162 кДж/моль

$M_{Cu}$  - молярна маса Cu, яка дорівнює 63,55 г/моль

$m_{дроту}$  - маса мідного дроту (згорівшого), яка дорівнює 0,0288 г

Тепер можемо обчислити вищу теплоту згоряння за формулою:

$$Q_{в} = Q_{згл.в} / m_{табл} = 20,386 \text{ МДж /кг}$$

Щоб знайти нижчу теплоту згоряння, спочатку потрібно дізнатися теплоту конденсації водяної пари, яка виділилася під час згорання зразку таблетки. Для цього потрібно швидко після досліду зібрати кухонною губкою весь конденсат з калориметричної бомби.

Маса губки = 1,60 г.

Маса губки з конденсатом = 1,93 г.

Тоді маса конденсату води = 1,93 - 1,60 = 0,33 г.

Теплота конденсації води = 1891 кДж/кг за таблицею з [16].

Теплота конденсації водяної пари:

$$Q_{квп} = \frac{1891 \times 0,33}{1000} = 0,62403 \text{ кДж}$$

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Нижча теплота згорання розраховується за формулою:

$$Q_n = \frac{Q_{\text{згл.в}} - Q_{\text{квп}}}{m_{\text{табл}}}, \text{ МДж/ кг}$$

$$Q_n = \frac{18958,86476 - 0,62403}{0,00093} = 19,715 \text{ МДж/ кг}$$

Висновок по проведеним дослідом на визначення теплотворної здатності брикетів з листя двох різних рецептів.

В першому досліді кількість теплоти при горінні більша, ніж у другому. Тому перший вид брикетів більше підходить для отоплення, наприклад. Але в другому виді, той що містить тирсу, більша вища та нижча теплота згорання. Це означає, що в ньому буде спалюватися більша частина домішок, що дасть більш чисті викиди під час горіння та не буде руйнувати так швидко піч чи котел.

#### 4.6. Дослідження на зольність

Мета визначити масову частку неорганічних залишків (золи), що утворюється після повного згорання зразків брикетів.

Опис роботи:

Дослід буде проводитися в муфельній печі. Спочатку її треба прогріти до 800 °С, що займає дві години часу. Після того, як піч прогрілася, беремо тигеля(в цьому досліді їх буде 4) та розміщуємо їх в печі, щоб вони прогрілися. Це робиться для того, щоб при подальшій роботі вони не потріскалися та не змінилася їхня маса. Як тільки вони прогріються їх варто обережно витягнути та охолодити.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62



Процес витягування тігелів з печі для подальшого охолодження

Поки тігеля охолоняють можна підготувати матеріал для спалювання, а сама два види брикет. Перший з листя та зв'язуючою речовиною картоном та другим з листя, тирси та зв'язуючою речовиною картоном. Брикети треба подрібнити на пилуку. Це можна зробити за допомогою звичайної кавомолки.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63



Подрібнені брикети на кавомолці

Поки підготовували матеріал охололи тігелі, тому їх треба зважити та зафіксувати їх масу.

Маса тігелів:

№1 - 46.9211 г

№7 - 38.3810 г

№4 - 34.1307 г

№3 - 52.9486 г

Після цього треба накласти в кожен тігель по 3 г зразку брикет. Два зразки першого виду брикетів в два тігеля та другого виду в інші два тігеля.

Тігелі = види брикетів:

№1 - 46.9211 г — листя + картон

№7 - 38.3810 г — листя + картон

№4 - 34.1307 г — листя + тирса + картон

№3 - 52.9486 г — листя + тирса + картон

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маса тігелів + брикетів:

№1 - 46.9211 г + 3 г = 49.9211 г — листя + картон

№7 - 38.3810 г + 3 г = 41.3810 г — листя + картон

№4 - 34.1307 г + 3 г = 37.1307 г — листя + тирса + картон

№3 - 52.9486 г + 3 г = 55.9486 г — листя + тирса + картон

Коли всі заміри були виконані можна поставити тігелі в муфельну піч, де вони мають простояти мінімум 1 годину.



Момент розміщення тігелів в піч

Як тільки пройшло достатньо часу тігелі варто витягнути з печі та повторно охолодити для подальшої роботи з ними.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65



Тігелі в сушарці

Тігелі були поміщені в сушарку для ефективнішого охолодження, адже в сушарці вмонтований термометр за яким можна з легкістю побачити чи охололи тігелі.

Після охолодження тігелі потрібно повторно зважити. Для цього використовувалися супер точні ваги.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66



Вигляд брикетів після муфельної печі

Маса тігелів + брикетів після першого розміщення в печі:

№1 - 47,1867 г

№7 - 38.6438 г

№4 - 34.2684 г

№3 - 53.0748 г

Розміщуємо повторно тігелі до печі після зважування. Це робиться для того, щоб вимірювання були якомога точніші.



Кінцевий вигляд брикетів після дослідів

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Маса тігелів + брикетів після другого розміщення в печі:

№1 - 47,1855 г

№7 - 38.6445 г

№4 - 34.2695 г

№3 - 53.0720 г

Похибка вимірювань:

№1 - 47,1867 – 47,1855 = 0,12%

№7 - 38.6438 – 38.6445 = 0,07%

№4 - 34.2684 – 34.2695 = 0,11%

№3 - 53.0748 – 53.0720 = 0,28%

Кожен зразок не перевищує допустимих значень, тому можна більше не підпалювати їх.

**Формула розрахунку зольності:**

$$A = \frac{m_1}{m_0} \cdot 100\%$$

де: А — зольність, %

$m_0$  — маса сухого зразка до згоряння, г

$m_1$  — маса золи після згоряння, г

Зольність:

№1 – 9,45 % — листя + картон

№7 – 9,33 % — листя + картон

№4 – 9,22 % — листя + тирса + картон

№3 – 9,48 % — листя + тирса + картон

**Нормативи:**

За ISO 17225-6:2021, допустима зольність для брикетів з недеревної біомаси — до 10% (клас А2).

Результати прикладу:

- Зразок 1 (листя + картон): 9,45 % та 9,33 % - в межах норми
- Зразок 2 (листя + тирса + картон): 9,22 % та 9,48 % - в межах норми

**Висновок:**

Після дослідження можна зробити висновок, що брикети з листя та листя і тирси, відповідають нормативам для ефективного та екологічного використання.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

#### 4.7. Аналіз продуктів згоряння

Мета досліджу оцінити екологічну безпечність брикетів з опалого листя шляхом визначення складу газів, що утворюються при згорянні, за допомогою газоаналізатора.

Методика проведення:

Для досліджу використовувався газоаналізатор ДОЗОР-С-М-3, здатний фіксувати концентрації основних газів:

- CO – чадний газ
- NO<sub>2</sub> – оксид азоту
- SO<sub>2</sub> – діоксид сірки



Сигналізатор-аналізатор газів ДОЗОР-С-М-3

Зразки брикетів спалювались у лабораторному твердопаливному котлі з димовідводом.

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69



Лабораторний твердопаливний котел

Для експерименту було спалено близько 2-ох кілограмів брикет з листя. Вони загорілися швидко та за 10-15 хв температура піднялася до 120 °С.



Вогонь з брикет

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Дані фіксувалися після стабілізації полум'я. Було взято зразок №1 диму в шприц при температурі 120 °С та зразок №2, коли температура досягла своєї вищої точки, а це 125 °С.



Два зразки диму в 20 мл шприцах

Далі вмикаємо газоаналізатор, під'єднуємо ємність для повітря. Після того як ємність підключена вимірюємо початкові дані. Як тільки дані були зафіксовані можна переходити до зразків. Береться шприц з димом та вводиться в двох літрову ємність 5 мл зразка, витягається та швидко заліплюється скотчем чи будь-якою клейкою стрічкою.



Ємність для повітря/диму

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

## Дослід з зразком №1

Початковий відлік:

- CO – 1,7 мг/м<sup>3</sup>
- NO<sub>2</sub> – 0,14 мг/м<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub> – 0,38 мг/м<sup>3</sup>

Результат вимірювання:

- CO = 15,4 мг/м<sup>3</sup>
- NO<sub>2</sub> = 0,15 мг/м<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub> = 0,57 мг/м<sup>3</sup>

Обчислення:

- CO = 15,4 - 1,7 = 13,7 · 400 = 5480 мг/м<sup>3</sup>
- NO<sub>2</sub> = 0,15 – 0,14 = 0,01 · 400 = 4 мг/м<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub> = 0,57 - 0,38 = 0,19 · 400 = 76 мг/м<sup>3</sup>

## Дослід з зразком №2

Початковий відлік:

- CO – 1,9 мг/м<sup>3</sup>
- NO<sub>2</sub> – 0,047 мг/м<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub> – 0,33 мг/м<sup>3</sup>

Результат вимірювання:

- CO = 20 мг/м<sup>3</sup>
- NO<sub>2</sub> = 0,098 мг/м<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub> – 0,52 мг/м<sup>3</sup>

Обчислення:

- CO = 20 – 1,9 = 18,1 · 400 = 7240 мг/м<sup>3</sup>
- NO<sub>2</sub> = 0,098 – 0,047 = 0,051 · 400 = 20,4 мг/м<sup>3</sup>
- SO<sub>2</sub> = 0,52 – 0,33 = 0,19 · 400 = 76 мг/м<sup>3</sup>

Висновок:

Таблиця з ISO/IEC 17025:2017 [14]

Речовина	ГДК (мг/м <sup>3</sup> , Україна)	Ліміт (EN 303-5, клас 5 котли)
CO (чадний газ)	5,0	≤ 500 мг/м <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	0,04	≤ 200 мг/м <sup>3</sup>
Тверді частинки РМ	0,15	≤ 40 мг/м <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	0,5	-

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

За таблицею допустимих норм бачимо, що СО (чадний газ) в обидвох зразках перевищує норму в декілька разів. Високий вміст СО свідчить про інтенсивне горіння. Також це може бути спричинене поганою продувкою в котлі чи закупорці його золою, що може повпливати на точність вимірювання.

Спостерігаємо низький вміст NO<sub>2</sub>, особливо в зразку №1, що не може не радувати. Нижчі концентрації NO<sub>2</sub>, що свідчить про краще згорання завдяки більш однорідній структурі та нижчій зольності.

SO<sub>2</sub> також має низьку концентрацію, що означає краще згорання.

Можна зробити висновок, що при правильному підборі котла можна спокійно обігрівати будинок, не шкодячи своєму здоров'ю.

#### 4.8. Порівняння з традиційними видами палива

Одним із ключових критеріїв оцінки доцільності використання брикетів з біомаси, зокрема з опалого листя, є їхнє порівняння з традиційними видами палива — дровами, вугіллям, природним газом та пелетами з деревини. Порівняння проводиться за такими основними параметрами: теплотворна здатність, зольність, екологічні характеристики, вартість і зручність використання.

##### Теплотворна здатність:

Таблиця [17]

**Таблиця 6. Питома теплота згорання  $q$  деяких видів палива**

Паливо	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Паливо	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Паливо	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
Антрацит	30	Дизельне паливо	42	Пропан	46
Бензин	46	Дрова сухі	10	Солома	14
Буре вугілля	12	Кам'яне вугілля	27	Спирт	27
Водень	120	Нафта	44	Сухе паливо	30
Гас	46	Порох	4	Торф	15
Деревне вугілля	34	Природний газ	44	Тротил	15

Брикетти з листя 20-18 МДж /кг за результатом дослідження в калориметричній бомбі. Це означає, що брикетти з листя є на рівні і навіть

вище за буре вугілля, сухі дрова, порох, соломку, торф та тротил. Але поступаються бензину, водню, деревному вугіллю, дизелю, кам'яному вугіллю, нафті та природному газу. Проте вони є достатньо ефективними для побутового опалення приміщень, особливо в умовах енергетичної нестабільності чи відсутності централізованого газопостачання.

#### **Зольність:**

<b>Вид палива</b>	<b>Зольність, % мас.</b>
Природний газ	0
Вугілля кам'яне	10–20
Дрова	1–3
Пелети деревні	0,5–1,5
<b>Брикети з листя</b>	<b>9-10</b>

Брикети з листя мають помірну зольність — значно меншу за вугілля, але вищу, ніж у деревини чи пелет. Зола з листяної біомаси містить поживні речовини і може бути використана як добриво, що додає екологічної доцільності.

#### **Екологічна безпечність:**

- Газ — найчистіше паливо, але є залежність від інфраструктури.
- Вугілля — високе забруднення повітря (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, пил), екологічно найнебезпечніше.
- Дрова і пелети — помірний рівень викидів, особливо при сухому згорянні.
- Брикети з листя — при правильному спалюванні дають низький рівень SO<sub>2</sub> і NO<sub>2</sub>, попіл можна використовувати як добриво.

#### **Економічна доцільність:**

<b>Вид палива</b>	<b>Орієнтовна ціна (за 2025 рік, грн/Гкал)</b>
Природний газ	1500–2000
Вугілля	1200–1800
Дрова	1800–2200
Пелети деревні	2500–2800
Брикети з листя	500–900*

\* — При самостійному виготовленні або використанні побутового пресу.

Використання листя як безкоштовної чи умовно безкоштовної сировини забезпечує високу рентабельність, особливо у приватних господарствах чи ОТГ.

#### **Зручність використання:**

- Газ – потребує централізованої системи і дозвільної документації.
- Вугілля – громіздке, забруднює приміщення, потребує спеціального зберігання.
- Дрова – займають багато місця, потрібне розколювання.
- Пелети – потребують автоматизованих систем подачі.
- Брикети з листя – компактні, легкі, дешеві, зберігаються сухо, можна виготовляти самостійно, легко транспортуються.

#### **Висновки**

Брикети з опалого листя, хоча й поступаються газу чи вугіллю за енергоємністю, є екологічно безпечним, економічно вигідним та доступним видом палива, що може ефективно використовуватися для локального опалення. За ряду параметрів вони перевершують вугілля та дрова, особливо з огляду на екологічні наслідки та повторне використання органічних відходів.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

## 5. ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження можливостей використання опалого листя як сировини для виготовлення твердого біопалива у формі брикетів. Актуальність обраної теми зумовлена сучасними викликами у сфері енергетичної безпеки України, зростаючим попитом на відновлювані джерела енергії, а також необхідністю ефективної утилізації сезонних органічних відходів, зокрема опалого листя, яке в умовах міського та сільського господарства часто не використовується раціонально.

У теоретичній частині роботи було проаналізовано стан використання відновлюваних джерел енергії у світі та в Україні. Встановлено, що біомаса посідає вагоме місце у структурі ВДЕ, демонструючи високий потенціал як екологічно безпечне і доступне джерело теплової енергії. Особливу увагу було приділено характеристикам біомаси недеревного походження.

У рамках експериментальної частини було розроблено модель побутової установки для брикетування, здійснено підготовку сировини (подрібнення, промивка, сушка, підбір зв'язуючих речовин), сформовано кілька рецептур брикетів з різним співвідношенням компонентів, зокрема:

- 75% опале листя + 25% картон;
- 50% листя + 20% деревна тирса + 20% картон.

Результати лабораторних досліджень підтвердили, що при оптимальному підборі рецептури можна досягти теплотворної здатності в межах 18–20 МДж/кг, що відповідає середнім значенням для дров'яного палива. Зразки з додаванням тирси та зв'язуючих речовин продемонстрували покращену міцність, знижену зольність (до 9,8%). Зольність брикетів з чистого листя залишалась в межах допустимих норм (до 10%) згідно з ISO 17225-6:2021.

Вологість зразків становила 9,2–9,5%, що відповідає стандартам для твердого біопалива. Це забезпечувало ефективне згоряння без надмірного утворення диму або втрат тепла на випаровування вологи.

Аналіз складу газів при спалюванні показав, що обидва види брикетів виділяють незначну кількість NO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub>, що свідчить про екологічну безпечність використання біопалива з опалого листя в побутових умовах.

Також було проведено порівняння з традиційними видами палива. У результаті встановлено, що брикети з листя мають теплотворну здатність, близьку до дров, але поступаються природному газу та вугіллю. Водночас вони вигідно вирізняються нижчою собівартістю, простотою виготовлення, екологічною безпечністю та можливістю локального виробництва без складної інфраструктури.

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити наступні узагальнюючі висновки:

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

## 6. ЛІТЕРАТУРА

1. Стаття 152 Кодексу України про адміністративні правопорушення
2. ДСТУ 2326-93 Котли опалювальні водогрійні
3. ДСТУ 7879:2015 Добрива мінеральні. Визначання вмісту амонійного азоту в простих амонійних добривах потенціометричним методом
4. Закон України № 2320-ІХ від 20.06.2022 «Про управління відходами»
5. ДСТУ 4462.0.01:2005 «Поводження з відходами»
6. Прес шнековий, екструдерний [Електронний ресурс] . - <https://lts.net.ua/ukr/press.htm>
7. Міжнародний стандарт ISO 17225-6:2021 «Тверде біопаливо – Специфікації та класи – Частина 6: НЕ деревинні брикети та пелети» для таких джерел біомаси, як опале листя, трава, агровідходи, солома тощо
8. Держстат України та оцінками екологічних організацій
9. ДСТУ 8358:2015 Брикети та гранули паливні з деревинної сировини. Технічні умови
10. ISO 18125:2017 – Solid biofuels – Determination of calorific value
11. ДСТУ ISO 1928:2006 – Тверде мінеральне паливо. Визначення теплоти згоряння бомбовим калориметром та розрахунок нижчої теплоти згоряння
12. ДСТУ ISO 18125:2019 – Біопаливо тверде. Визначення теплотворної здатності
13. ДСТУ ISO 9096:2012 Метрологія. Комплекси діагностичні акустико-емісійні. Методика повірки
14. ISO/IEC 17025:2017 – *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
15. Калориметрія [Електронний ресурс] . - <https://surl.li/tdbqni>
16. Паливні брикети [Електронний ресурс]. - <https://surl.li/mrkmgd>
17. Фізика 8 клас (Бар'яхтар В. Г., Божинова Ф. Я., Довгий С. О., Кірюхіна О.О. (за ред. Бар'яхтар В. Г., Довгого С.О.))/15. Теплота згоряння палива. Коефіцієнт корисної дії нагрівника, 2016 р., с. 237

					401HT-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опале листя є перспективною біосировиною для виробництва твердого палива з урахуванням його сезонної доступності та екологічної утилізації.

Найкращі експлуатаційні характеристики брикети демонструють при змішаній рецептурі (листя + тирса + натуральне зв'язуюче), що забезпечує оптимальний баланс між теплотою згоряння, зольністю та міцністю.

Побутові установки для брикетування дозволяють виготовляти якісне біопаливо без значних капіталовкладень, що робить технологію доступною для населення та малих фермерських господарств.

Використання листяних брикетів є економічно доцільним, особливо в умовах децентралізованого тепlopостачання, за відсутності доступу до газових мереж чи при підвищених тарифах на традиційне паливо.

З урахуванням наведених даних, запропонована технологія виробництва біопалива з опалого листя є реалістичною, ефективною та екологічно виправданою альтернативою традиційним джерелам енергії. Її подальше впровадження може стати одним із напрямів сталого розвитку енергетичного сектору України в умовах переходу до зеленої економіки.

					<b>401НТ-№9475971-ДП</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

## 6. ЛІТЕРАТУРА

1. Стаття 152 Кодексу України про адміністративні правопорушення
2. ДСТУ 2326-93 Котли опалювальні водогрійні
3. ДСТУ 7879:2015 Добрива мінеральні. Визначання вмісту амонійного азоту в простих амонійних добривах потенціометричним методом
4. Закон України № 2320-ІХ від 20.06.2022 «Про управління відходами»
5. ДСТУ 4462.0.01:2005 «Поводження з відходами»
6. Прес шнековий, екструдерний [Електронний ресурс] . - <https://lts.net.ua/ukr/press.htm>
7. Міжнародний стандарт ISO 17225-6:2021 «Тверде біопаливо – Специфікації та класи – Частина 6: НЕ деревинні брикети та пелети» для таких джерел біомаси, як опале листя, трава, агровідходи, солома тощо
8. Держстат України та оцінками екологічних організацій
9. ДСТУ 8358:2015 Брикети та гранули паливні з деревинної сировини. Технічні умови
10. ISO 18125:2017 – Solid biofuels – Determination of calorific value
11. ДСТУ ISO 1928:2006 – Тверде мінеральне паливо. Визначення теплоти згоряння бомбовим калориметром та розрахунок нижчої теплоти згоряння
12. ДСТУ ISO 18125:2019 – Біопаливо тверде. Визначення теплотворної здатності
13. ДСТУ ISO 9096:2012 Метрологія. Комплекси діагностичні акустико-емісійні. Методика повірки
14. ISO/IEC 17025:2017 – *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
15. Калориметрія [Електронний ресурс] . - <https://surl.li/tdbqni>
16. Паливні брикети [Електронний ресурс]. - <https://surl.li/mrkmgd>
17. Фізика 8 клас (Бар'яхтар В. Г., Божинова Ф. Я., Довгий С. О., Кірюхіна О.О. (за ред. Бар'яхтар В. Г., Довгого С.О.))/15. Теплота згоряння палива. Коефіцієнт корисної дії нагрівника, 2016 р., с. 237

					401НТ-№9475971-ДП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78