МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра нетрадиційної енергетики та екології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Теплофізичні характеристики паливних матеріалів нетрадиційної та атомної енергетики»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-61
Шубін В.О спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: нетрадиційна
енергетика та екологія
Керівник:
д. ф.-м. н., доцент Семененко В.Є
Рецензент:

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра нетрадиційної енергетики та екології

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр

Спеціальність: 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма: Нетрадиційна енергетика та екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр КУЛИК
підпис

«_____» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра студентові

Шубіну Вадиму Олеговичу

1. Тема роботи «Теплофізичні характеристики паливних матеріалів нетрадиційної та атомної енергетики»,
   керівник роботи доцент Семененко Володимир Єговорович,
   затверджені наказом по університету від 27 вересня 2024 № 4201-5/ 3081.
2. Строк подання студентом роботи 29 листопада 2024 р.
3. Перелік питань, які потрібно розглянути:
   1. Ознайомитися з методами аналізів характеристик, я теоритичними так і експериментальними

2. Згрупувати та проаналізувати характеристики різних видів палива.
3. Провести аналіз характеристик, привести методи для покращення ефективності палив.
4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого, третього та четвертого розділу
6	Написання п'ятого, шостого та сьомого розділу
7	Завершення написання кваліфікаційної роботи(Висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Обговорення відгуку та рецензії. Підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання «10» жовтня 2024 р.

Студент _____ Вадим ШУБІН
підпис

Керівник роботи _____ Володимир СЕМЕНЕНКО
підпис

РЕФЕРАТ

Шубін Вадим «Теплофізичні характеристики паливних матеріалів нетрадиційної та атомної енергетики»

Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: Харківській національний університет імені В. Н.Каразіна, 2024. – 77 с.

У роботі досліджуються теплофізичні характеристики палива, їх значення,можливе поліпшення ефективності палива та їх застосування в енергетичних технологіях. Цінність такого палива та вплив на навколишнє середовище. На першому етапі аналізуються теоретичні основи теплофізичних характеристик палива, методи їх вимірювання. Далі відбувається аналіз різного палива та їх порівняння. Після чого їх екологічна та економічна цінність. Та надалі відбувається аналіз видобутку палива та використання палива, з подальшими рекомендаціями щодо поліпшення цих процесів та порівняння ефективності водню відносно антрациту на прикладі циклу їх перетворення в енергію.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Паливо, характеристики, калориметрія, енергоефективність, теплопровідність, теплоємність.

ABSTRACT

Shubin Vadim "Thermophysical Properties of Fuel Materials for Non-Traditional and Nuclear Energy"
Master's Thesis in Applied Physics. – Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2024. – 72 p.

This work investigates the thermophysical properties of fuels, their significance, potential improvements in fuel efficiency, and their applications in energy technologies. The value of such fuels and their impact on the environment are also discussed. In the first stage, the theoretical foundations of thermophysical properties of fuels and methods of their measurement are analyzed. Next, various types of fuel are analyzed and compared. After that, their ecological and economic value is considered. The study further explores fuel extraction and usage, with recommendations for improving these processes and comparing the efficiency of hydrogen relative to anthracite in the context of their conversion to energy.

KEYWORDS: Fuel, properties, calorimetry, energy efficiency, thermal conductivity, heat capacity.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛИВА

1.1 Основні поняття та визначення

1.2 Методи вимірювання теплофізичних характеристик

1.3 Теплофізичні властивості палив у енергетичних процесах

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАДИЦІЙНИХ ПАЛИВНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Вугілля, нафта, природний газ

2.2 Порівняльний аналіз теплофізичних характеристик

РОЗДІЛ 3. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕТРАДИЦІЙНИХ ПАЛИВ

3.1 Водень як паливо: фізико-хімічні властивості, теплотворна здатність

3.2 Сірководень в контексті енергетичних технологій

3.3 Азот як компонент у паливних системах

3.4 Біопаливо: види, властивості, перспективи використання

РОЗДІЛ 4. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЛИВА ДЛЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

4.1 Властивості ядерного палива

4.2 Теплофізичні характеристики матеріалів для теплообмінників та конструкцій реакторів

РОЗДІЛ 5. ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ПАЛИВ

5.1 Вплив на навколишнє середовище

5.2 Економічні переваги та обмеження використання нетрадиційних палив

РОЗДІЛ 6. МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ПАЛИВ ДЛЯ ТРАДИЦІЙНОЇ, НЕТРАДИЦІЙНОЇ ТА АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.

6.1 Аналіз способів видобутку та отримання палив

6.2 Аналіз способів використання палив

6.3 Оцінка методів покращення ефективності палива

РОЗДІЛ 7. ПОРІВНЯННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ, З ТОЧКИ ЗОРУ ВИРОБЛЕННЯ, АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА З ТРАДИЦІЙНИМ

7.1 Спрощене порівняння водню з антрацитом

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

ВСТУП

Актуальність теми. Енергетика є однією з ключових галузей, що забезпечує життєдіяльність сучасного суспільства. Від ефективності енергетичних систем залежить розвиток економіки, забезпечення життєвих потреб населення та вплив на екологічну ситуацію в світі. Традиційні джерела енергії, зокрема вугілля, нафта та природний газ, активно використовуються протягом останніх століть, проте з огляду на виснаження природних ресурсів, зміну клімату та глобальні екологічні виклики зростає потреба в пошуку нових, більш стійких і екологічно чистих джерел енергії.

Особливу увагу у цьому контексті заслуговують нетрадиційні паливні матеріали, такі як водень, і біопаливо. Ці види палива, завдяки своїм особливим фізико-хімічним властивостям, здатні значно зменшити залежність енергетичних технологій від викопних палив і стати важливою частиною енергетичної стратегії майбутнього. Водночас, для ефективного використання цих матеріалів необхідно детально дослідити їх теплофізичні характеристики, які визначають ефективність та безпеку енергетичних процесів.

Теплофізичні характеристики палива включають в себе важливі параметри, такі як теплоємність, теплотворна здатність, теплопровідність, температуру плавлення, теплоту випаровування тощо. Ці характеристики визначають не тільки ефективність енергетичних установок, але й їхній вплив на навколишнє середовище. Вони є основою для розробки нових енергетичних технологій, які повинні відповідати вимогам енергетичної безпеки, екологічності та економічної вигоди.

Метою даної роботи є комплексне дослідження теплофізичних характеристик традиційних і нетрадиційних паливних матеріалів, а також їхнього використання в енергетичних процесах, зокрема в атомній енергетиці. Зокрема, робота буде зосереджена на вивченні властивостей таких нетрадиційних джерел енергії, як водень, сірководень, азот і біопаливо, а

також їхнього потенціалу для застосування в сучасних енергетичних установках. Та теоретичного поліпшення ефективності як традиційного так і нетрадиційного палива.

Об’єкт дослідження - теплофізичні характеристики паливних матеріалів та їх застосування в енергетичних технологіях.

Предмет дослідження - вплив теплофізичних характеристик на ефективність енергетичних установок.

Методи дослідження: у роботі будуть використані методи теоретичного аналізу, порівняння, математичного моделювання теплофізичних процесів, а також методи експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів: порівняльний аналіз характеристик різного палива, приведення способів здешевлення виробництва, та покращення видобутку.

Практичне значення отриманих результатів - отримані результати, позитивно вказують на розвиток нетрадиційного палива, та на ,можливу, повну заміну традиційного палива.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 77 сторінок із них основного тексту 60 сторінок, 2 рисунків із текстом, список використаних джерел із 50 найменувань 5 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛИВА

1.1 Основні поняття та визначення

Теплофізичні характеристики матеріалів є ключовими для розуміння процесів, що відбуваються під час їх використання в енергетичних установках. Вони описують взаємодію матеріалу з енергією у вигляді тепла, що дозволяє оцінювати ефективність палива, вибирати оптимальні матеріали для конкретних енергетичних технологій та розробляти нові методи їх застосування.

Теплофізика є фундаментальною дисципліною, що вивчає термодинамічні та кінетичні процеси, пов’язані з передачею тепла в різних матеріалах. Вона охоплює фізичні принципи, які визначають, як тепло передається через матеріали, як змінюється температура при зміні енергії, і які механізми зумовлюють ці зміни. Теплофізика є основою для багатьох інженерних дисциплін, зокрема в енергетиці, де важливо враховувати температурні та енергетичні потоки в теплообмінних системах.

Теплофізика - це розділ фізики, який вивчає теплові властивості речовин і матеріалів, а також процеси передачі тепла. Вона охоплює широкий спектр явищ, що пов'язані з теплом, температурою та енергією. Теплофізичні властивості матеріалів є важливими для розуміння і прогнозування їх поведінки в різних енергетичних процесах.

Теплофізика займається визначенням кількості енергії, що поглинається або віддається матеріалом під час змін температури, а також властивостей, які визначають швидкість передачі тепла через матеріал. Для цього використовуються різноманітні термодинамічні та кінетичні моделі, що дозволяють прогнозувати ефективність матеріалу в тих чи інших умовах.

У контексті енергетичних процесів теплофізика дозволяє розробляти та оптимізувати різноманітні технології для забезпечення ефективного перетворення тепла в інші форми енергії. Одним із ключових аспектів теплофізики є визначення теплових властивостей матеріалів, оскільки від цих характеристик залежить, як швидко та ефективно матеріали можуть передавати тепло, а також їх здатність до поглинання та зберігання енергії.

Теплофізичні характеристики паливних матеріалів є важливою складовою їх ефективного використання в енергетичних технологіях. Ці характеристики описують, як паливо поводить себе в умовах теплових процесів, включаючи передачу тепла, зміну фазових станів і хімічне згоряння. Їх розуміння дозволяє забезпечити оптимальні умови для роботи енергетичних систем, розробляти нові технології використання нетрадиційних палив, таких як водень, сірководень, азот і біопаливо.

Основними теплофізичними властивостями є:

- теплотворна здатність (кількість тепла, що вивільняється при повному згорянні палива) $h = Q/m$, де Q - кількість теплоти виділена паливом, m - маса палива;
- теплопровідність (здатність матеріалу проводити тепло) □, де $\lambda = Q * d/(S * \Delta T)$, де S - площа перерізу, d - товщина матеріалу, Q - кількість теплоти, ΔT - різниця температур у матеріалі;
- теплоємність (кількість тепла, потрібна для підвищення температури одиниці маси матеріалу на один градус) $c = Q/(m * \Delta T)$, де Q - кількість теплоти, m - маса палива, ΔT - різниця початкової та кінечної температури;
- температура плавлення і кипіння (визначають межі змін фазового стану) $dp/dT = L/(T * \Delta V)$, де T - шукана температура, L - кількість тепла при при фазовому переході одиниці маси палива без зміни температури, ΔV - зміна об’єму палива, dp/dT - похідна тиску по температурі.

Ці характеристики не тільки визначають енергетичну цінність матеріалу, але й впливають на його застосування у високотемпературних або спеціальних умовах, зокрема в атомній чи альтернативній енергетиці.

Теплотворна здатність є ключовою характеристикою, що визначає енергетичну ефективність палива. Вона вимірюється у двох значеннях: вища і нижча теплотворна здатність. Вища теплотворна здатність враховує повне виділення тепла, включаючи тепло, яке виділяється при конденсації водяної пари. Нижча теплотворна здатність враховує тільки тепло, доступне без урахування конденсації.

Порівняння теплотворних здатностей нетрадиційних палив з традиційними (нафта, газ) показує, що водень має найвищу теплотворну здатність - 141.9 МДж/кг, тоді як біопаливо варіюється від 20 до 30 МДж/кг, залежно від сировини.

Таблиця 1.1. Теплотворні здатності паливних матеріалів

Пальне	Теплотворна здатність, МДж/кг
Водень	141.9
Сірководень	58.0
Біопаливо	20.0–30.0
Природний газ	55.0

Висока теплотворна здатність водню робить його привабливим для використання в авіації та автомобільній галузі. Водночас біопаливо має перевагу як відновлювальний ресурс із низьким впливом на екологію.

Теплопровідність і теплоємність є основними характеристиками, які визначають, наскільки ефективно матеріал передає або накопичує тепло. Теплопровідність вимірюється у ватах на метр на градус (Вт/(м·К)) і є

ключовою для матеріалів, що застосовуються в теплообмінниках або ізоляційних системах.

Наприклад, низька теплопровідність водню вимагає спеціальних підходів для його зберігання і транспортування в умовах високого тиску або низьких температур. Біопаливо, залежно від складу, може демонструвати теплопровідність, схожу на традиційні види палива, що спрощує його використання у звичайних енергетичних установках.

Теплоємність, яка вимірюється у Дж/(кг·К), визначає кількість тепла, необхідного для підвищення температури матеріалу. Для біопалива, водню і сірководню цей показник змінюється залежно від хімічного складу і фазового стану (газ, рідина, тверде тіло).

Температура плавлення і кипіння є критичними параметрами для оцінки можливостей використання палива в умовах високих температур. Наприклад, водень має температуру кипіння -252.87°C, що обумовлює необхідність кріогенних систем для його зберігання. Сірководень, навпаки, має температуру кипіння 60.4°C, що робить його зберігання можливим у звичайних умовах, але ставить виклик у питаннях безпеки через токсичність.

Для біопалива температурні межі залежно від складу (масло, етанол, біогаз) можуть значно варіюватися, але його перевага в тому, що зберігання та транспортування можливі в стандартних умовах, що зменшує витрати на інфраструктуру.

Вплив теплофізичних характеристик палива на енергетичні процеси особливо помітний у таких галузях, як:

- атомна енергетика, де високі температури вимагають матеріалів з високою теплопровідністю для швидкого відведення тепла;
- альтернативна енергетика, де ефективне зберігання і використання водню чи біопалива визначає конкурентоспроможність технологій.

Наприклад, у водневих паливних елементах ключовим фактором є висока теплотворна здатність і низький екологічний вплив при згорянні. У випадку з біопаливом важливими є екологічні переваги та можливість повторного використання біологічних залишків.

Розуміння теплофізичних характеристик матеріалів є фундаментом для розробки енергетичних систем майбутнього. Нетрадиційні види палива, такі як водень, сірководень, азот і біопаливо, мають унікальні властивості, що визначають їх перспективність у різних галузях енергетики. Їх використання вимагає детального вивчення, розробки спеціальних матеріалів і технологій для забезпечення максимальної ефективності та екологічної безпеки.

1.2 Методи вимірювання теплофізичних характеристик

Теплофізичні характеристики є фундаментальними параметрами, які визначають поведінку матеріалів у процесах, пов'язаних із теплопередачею, фазовими перетвореннями та енергетичними перетвореннями. Для забезпечення точності розрахунків і проектування систем необхідно проводити вимірювання цих характеристик із застосуванням сучасних експериментальних методів. У цьому розділі розглянуто основні підходи до визначення теплофізичних властивостей, а також їх практичне застосування.

Вимірювання теплофізичних характеристик проводиться шляхом застосування експериментальних методів, які враховують природу процесів передачі тепла та властивості матеріалу. Ці методи базуються на принципах термодинаміки, кінетики і молекулярної фізики. Основна мета таких методів - визначення точних значень теплоємності, теплопровідності, теплотворної здатності та інших характеристик за різних умов, включаючи високі або низькі температури, зміну тиску та фазового стану матеріалу.

Основними експериментальними методами є калориметрія, диференціальний термічний аналіз, дериватографія і розрахунки на основі законів термодинаміки.

Калориметрія - це метод вимірювання теплових ефектів хімічних реакцій. Для цього використовуються калориметри, пристрої, які дозволяють вимірювати кількість тепла, що виділяється або поглинається під час реакції.

Найбільш поширена наступна класифікація калориметрів: адіабатичні, ізотермічні, діатермічні, диференціальні, теплопровідні (Кальве) та проточні.

В адіабатичному теплообмін калориметричної системи з довкіллям відсутній, що дозволяє точно вимірювати кількість теплоти, що виділяється або поглинається під час хімічних реакцій або фізичних процесів (теплоту реакції, механічного перемішування, випаровування тощо), оскільки весь енергообмін зосереджений в межах самої системи.

В ізотермічних калориметрах теплопровідність калориметра дуже велика і теплота не акумулюється в калориметрі, а швидко переходить у зовнішнє середовище. Різниця температур тут завжди дуже мала. Її вимір дуже утруднений і неточний, але їх часто застосовують визначення теплових ефектів тривалих процесів які мають специфічне призначення.

У діатермічних калориметрах кількість теплоти визначається зміною температури калориметричної системи.

Дифиренціальний реєструє різницю температур, що виникає між двома зразками через термічний ефект, який не може бути віднесений до еталонного зразка.

У калориметрах Кальве вимірюється термоелектрорушійна сили, що виникає в термобатареї при проходженні через неї теплового потоку від реакційної камери до масивного калориметричного металевого блоку термостата калориметра або навпаки.

У проточних калориметрах тепловий ефект визначається за відомими питомою теплоємністю та масою газу або рідини, що несуть тепло з реакційної камери.

Один із основних підходів до вимірювання теплофізичних характеристик базується на створенні контрольованого температурного градієнта в досліджуваному матеріалі. Вимірюючи параметри теплового потоку і температури, можна отримати точні значення таких величин, як теплопровідність або теплоємність. Для цього використовуються спеціалізовані прилади, що дозволяють підтримувати стабільний тепловий режим протягом усього експерименту.

Визначення теплоємності є важливим етапом у дослідженні матеріалів. Одним із основних методів є використання диференціального скануючого калориметра (DSC). Цей прилад дозволяє вимірювати кількість тепла, яке необхідне для підвищення температури зразка на певний градус. Зразок і еталонний матеріал нагрівають одночасно, реєструючи різницю в теплових потоках. Цей метод дозволяє оцінити зміну теплоємності під час фазових перетворень, таких як плавлення, кипіння або кристалізація.

Для зразків, які знаходяться в газоподібному стані, використовуються методи із застосуванням ізотермічної калориметрії. Вони дозволяють вимірювати теплоємність у широкому діапазоні температур, що особливо важливо для водню та сірководню, які мають низькі точки кипіння.

Також завдяки калориметрії можна знайти ентальпію реакції (ΔH), яка вказує на тепловий ефект реакції, тобто на те виділяється чи поглинається тепло

Теплопровідність є важливим параметром, що характеризує здатність матеріалу проводити тепло. Один із методів її вимірювання - метод стаціонарного теплового потоку, в якому зразок розташовується між двома тепловими резервуарами з відомими температурами. Температурний градієнт

створює тепловий потік, який реєструється за допомогою термоелементів. На основі цього потоку розраховується коефіцієнт теплопровідності.

Для матеріалів із високою теплопровідністю, таких як метали або спеціальні сплави, використовується метод лазерного імпульсу. Випромінювання лазера нагріває поверхню зразка, і швидкість передачі тепла через матеріал дозволяє визначити його теплопровідність. Цей метод особливо важливий для дослідження матеріалів у екстремальних умовах, наприклад, у ядерних реакторах.

Таблиця 1.2 - Порівняння методів вимірювання теплопровідності

Метод	Особливості застосування	Точність	Приклади матеріалів
Стаціонарний потік	Підходить для широкого діапазону матеріалів	Висока	Тверді тіла, рідини
Лазерний імпульс	Використовується для матеріалів з високою теплопровідністю	Дуже висока	Сплави, метали, кераміка
Метод гарячого дроту	Підходить для рідин і газів	Середня	Водень, азот, сірководень

Фазові переходи, такі як плавлення, кипіння або сублімація, є важливими для теплофізичного аналізу. Для їх дослідження використовуються калориметричні методи в поєднанні з термогравіметрією. Вимірюється кількість тепла, необхідного для зміни фазового стану матеріалу, а також його залежність від тиску і температури.

Наприклад, для водню визначення точки кипіння (-252.87°C) проводиться за допомогою кріогенних установок, що дозволяють точно

підтримувати низькі температури. Аналогічно, для біопалива використовуються методи термогравіметричного аналізу, що дозволяють враховувати складність хімічного складу і процесів розкладу органічних матеріалів.

Визначення теплотворної здатності палива проводиться за допомогою бомбового калориметра, де зразок палива спалюється в закритій ємності, оточеній водяною банею. Реєструється кількість тепла, що виділяється, і на основі цього розраховується теплотворна здатність. Для водню та сірководню, через їх газоподібний стан, потрібні спеціальні установки, що забезпечують безпечне спалювання та точне вимірювання.

Таблиця 1.3 - Приклади теплотворних здатностей різних палив

Пальне	Теплотворна здатність, МДж/кг	Метод визначення
Водень	141.9	Бомбовий калориметр
Сірководень	58.0	Калориметрична камера
Біопаливо	20.0–30.0	Термохімічний аналіз

Для газоподібних матеріалів, таких як водень, сірководень і азот, застосовуються методи, які враховують їх низьку густину і специфічну поведінку при зміні тиску та температури. Наприклад, теплопровідність газів вимірюється методом гарячого дроту, де дріт нагрівається, і аналізується швидкість теплопередачі через газове середовище. Це дозволяє отримати точні дані навіть за дуже низьких температур.

Також ефективність реакцій можна визначити за допомогою законів термодинаміки. Зокрема, другий закон термодинаміки стверджує, що будь-яка реакція відбувається за умови, що сума ентальпій продуктів реакції зі зворотньою знаковою сумою ентальпій реагентів рівна нулю ($\Sigma\Delta H = 0$). Це означає, що ентальпія продуктів має бути меншою за ентальпію реагентів для

екзотермічних реакцій (реакції, які виділяють тепло) і більшою для ендотермічних реакцій (реакції, які поглинають тепло).

Для розрахунків теплових ефектів реакцій у стандартних умовах використовують стандартні табличні дані та закон Гесса $\Delta H = (\sum \Delta H$ продуктів) - ($\sum \Delta H$ реагентів). Але якщо температура буде змінюватись, тоді використовують закон Кірхгофа $(\frac{\partial(\Delta H)}{\partial T})_p = \Delta c_p$ для ізобарного процесу та $(\frac{\partial(\Delta U)}{\partial T})_v = \Delta c_v$ для ізохорного. Де ΔH та ΔU це зміни енергії відносно зміни температури, а Δc_v та Δc_p різниця теплоємностей речовин. Що при знаннях о кінцевій та початковій температурі дає можливість визначити ефективність реакції.

Методи вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів забезпечують надійну основу для проектування енергетичних систем і розробки нових технологій. Для кожного типу палива, зокрема водню, сірководню, азоту і біопалива, використовуються спеціальні підходи, що враховують їх фізичні та хімічні властивості. Поєднання експериментальних методів із сучасними приладами дозволяє отримувати точні дані, необхідні для оптимізації енергетичних процесів.

1.3 Теплофізичні властивості палив у енергетичних процесах

Теплофізичні властивості паливних матеріалів мають ключове значення для розробки і функціонування сучасних енергетичних систем. Вони визначають здатність палива до згоряння, передачі тепла, накопичення енергії та поведінки в умовах екстремальних температур і тиску. У цьому розділі розглядаються ключові теплофізичні характеристики водню, сірководню, азоту та біопалива, які є перспективними для використання в енергетичних процесах, а також їх вплив на ефективність і стабільність роботи енергетичних установок.

У контексті енергетичних процесів теплофізичні властивості палива забезпечують основні показники його ефективності. Найважливішими серед цих властивостей є:

- Теплотворна здатність, яка визначає кількість енергії, що виділяється під час згоряння;
- Теплопровідність, що впливає на швидкість передачі тепла в енергетичних установках;
- Теплоємність, яка визначає здатність палива акумулювати тепло без значного підвищення температури;
- Температури плавлення та кипіння, що визначають поведінку палива при різних температурних режимах.

Ці властивості є критичними при виборі палива для конкретних умов. Наприклад, для атомних електростанцій важлива висока теплопровідність теплоносіїв, тоді як в альтернативних джерелах енергії (сонячні, водневі) важливіший екологічний баланс та зручність зберігання.

Теплотворна здатність є найважливішим параметром, який визначає ефективність палива в енергетичних процесах. Для різних типів палив, таких як водень, сірководень та біопаливо, цей показник може суттєво відрізнятися. Водень, наприклад, має одну з найвищих теплотворних здатностей серед відомих палив - 141,9 МДж/кг. Це робить його привабливим для використання у високотехнологічних сферах, таких як авіація чи космонавтика.

Сірководень має помірну теплотворну здатність (58 МДж/кг), але його перевагою є доступність і можливість утилізації як побічного продукту у хімічній промисловості. Біопаливо варіюється за теплотворною здатністю залежно від виду сировини. Наприклад, біодизель, отриманий з рослинних масел, має показники близькі до традиційних видів палива, тоді як біогаз суттєво поступається їм.

Таблиця 1.4 - Теплотворні здатності різних палив

Тип палива	Теплотворна здатність, МДж/кг
Водень	141.9
Сірководень	58.0
Біопаливо (біодизель)	30.0
Природний газ	55.0

Ці показники демонструють різницю в енергетичній ефективності, але важливо враховувати також вартість, екологічні наслідки та технологічну доступність використання кожного з видів палива.

Теплопровідність визначає здатність матеріалу передавати тепло і є критичною для роботи енергетичних установок, де потрібно забезпечити швидкий відвід тепла від нагрівальних поверхонь. У випадку водню його низька теплопровідність вимагає застосування спеціальних методів теплопередачі, таких як використання високоефективних теплообмінників. У той же час, теплоємність водню дозволяє використовувати його для акумулювання теплової енергії.

Біопаливо, залежно від складу, демонструє теплопровідність, що відповідає традиційним видам палива, що спрощує його інтеграцію в існуючі теплообмінні системи. Сірководень має середні значення теплопровідності, що робить його придатним для високотемпературних процесів, але вимагає особливої уваги до питання корозії матеріалів.

Таблиця 1.5 - Теплопровідність та теплоємність паливних матеріалів

Тип палива	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, Дж/(кг·К)

Водень	0.180	14,30
Сірководень	0.200	1,38
Біопаливо (середнє)	0.150	1,75
Природний газ	0.160	2,22

Такі дані підтверджують, що водень є ефективним для певних специфічних технологій, але вимагає адаптації до існуючих систем.

Температури плавлення і кипіння визначають можливості використання палива в різних умовах. Водень має надзвичайно низьку температуру кипіння (-252,87 °C), що вимагає кріогенних умов для його зберігання і транспортування. Сірководень має вищі температурні межі, що дозволяє зберігати його у звичайних умовах. Біопаливо, залежно від виду (твердий, рідкий або газоподібний), може адаптуватися до стандартних температурних режимів, що спрощує його використання.

Таблиця 1.6 - Температури плавлення та кипіння паливних матеріалів

Тип палива	Температура плавлення, °C	Температура кипіння, °C
Водень	-259.16	-252.87
Сірководень	-85.5	60.4
Біопаливо (біодизель)	-15	180
Природний газ	-182.5	-161.5

Ці дані свідчать про те, що вибір палива залежить не тільки від його енергетичних характеристик, але і від технологічних вимог до його зберігання та транспортування.

Теплофізичні властивості палив відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективності енергетичних процесів. Водень демонструє найвищу енергетичну ефективність, але вимагає значних технологічних зусиль для його використання. Сірководень і біопаливо є перспективними альтернативами для певних умов, пропонуючи помірну теплотворну здатність і простіші умови зберігання. Для розвитку енергетики майбутнього необхідно продовжувати дослідження теплофізичних характеристик цих та інших палив, а також розробляти інноваційні підходи до їх використання.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАДИЦІЙНИХ ПАЛИВНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Вугілля, нафта, природний газ

Енергетичні ресурси вугілля, нафти та природного газу відіграють вирішал ьну роль у світовій енергетиці та промисловості. Ці види викопного палива забезпечують більшість глобальних енергетичних потреб завдяки високій теплотворній здатності, широкій доступності та розвиненій інфраструктурі їх використання. У цьому розділі розглядаються теплофізичні властивості цих матеріалів, їх енергетична ефективність та вплив на технологічні процеси.

Вугілля є одним із найдавніших джерел енергії, використовуваних людством. Його основними теплофізичними характеристиками є теплотворна здатність, зольність, вміст вологи та сірки. Типи вугілля - антрацит, буре вугілля, кам’яне вугілля - відрізняються за хімічним складом та енергетичною цінністю.

Антрацит має найвищу теплотворну здатність серед видів вугілля, яка становить приблизно 30–36 МДж/кг, тоді як буре вугілля через високий вміст вологи (до 50%) має теплотворну здатність лише 8–12 МДж/кг. Кам’яне вугілля займає проміжне положення з теплотворною здатністю 24–28 МДж/кг.

Таблиця 2.1. Основні характеристики різних видів вугілля

Тип вугілля	Теплотворна здатність, МДж/кг	Вміст вологи, %	Вміст сірки, %	Зольність, %
Антрацит	30–36	<10	0.5–1.5	5–15
Кам'яне вугілля	24–28	10–25	1.0–2.0	10–20
Буре вугілля	8–12	30–50	0.5–1.5	5–10

Висока зольність і вміст сірки в деяких видах вугілля є проблемою для екології, оскільки продукти згоряння спричиняють утворення кислотних дощів і виділення твердих частинок.

Нафта є рідким паливом, що складається переважно з вуглеводнів. Вона використовується у вигляді сировини для виробництва палива (бензин, дизель, мазут) і хімічної промисловості. Нафта має високу теплотворну здатність, що становить 42–44 МДж/кг, залежно від типу і складу.

Важливими теплофізичними характеристиками нафти є її в'язкість, густина та температура займання. Ці параметри впливають на ефективність її транспортування, зберігання та згоряння.

Таблиця 2.2 - Основні теплофізичні властивості нафти

Параметр	Значення
Теплотворна здатність, МДж/кг	42–44
Густина, кг/м³	800–950
В'язкість, мм²/с	2–6

Температура займання, °C	38–90

Висока енергетична ефективність нафти робить її основним джерелом енергії в транспортному секторі, але видобуток і переробка нафти пов’язані з екологічними ризиками, зокрема ризиком забруднення ґрунтів і водойм.

Природний газ є найдоступнішим і найекологічнішим серед викопного палива. Основним компонентом природного газу є метан (CH_4), який визначає його теплофізичні властивості. Газ має теплотворну здатність 35–55 МДж/м³ залежно від складу, що включає домішки етану, пропану, азоту та вуглекислого газу.

Однією з переваг природного газу є низький вміст забруднюючих речовин у продуктах згоряння. Крім того, природний газ має високу теплопровідність і низьку густину, що полегшує його транспортування через трубопроводи.

Таблиця 2.3 - Основні теплофізичні властивості природного газу

Параметр	Значення
Теплотворна здатність, МДж/м³	35–55
Основний компонент	Метан (до 95%)
Густина, кг/м³	0.7–0.9
Температура займання, °C	630–650

Завдяки високій екологічності природний газ часто використовується в енергетиці, як паливо для котелень, електростанцій і в промислових процесах. Технології зрідження природного газу (СПГ) дозволяють значно розширити його транспортну доступність.

Теплофізичні властивості вугілля, нафти та природного газу безпосередньо впливають на енергетичну ефективність та технологічні можливості їх використання. Наприклад, висока теплотворна здатність нафти дозволяє ефективно застосовувати її для виробництва електроенергії в умовах обмеженого доступу до інших видів палива. Природний газ, завдяки своїй високій екологічності, стає основним джерелом енергії для країн із суворими екологічними нормами.

Експлуатаційні характеристики цих палив, такі як зольність вугілля чи густина нафти, впливають на дизайн обладнання, наприклад, котлів, трубопроводів і теплообмінників. Знання теплофізичних властивостей дозволяє розробляти ефективні системи спалювання, транспортування та зберігання.

Використання вугілля, нафти та природного газу супроводжується викидами парникових газів, які спричиняють глобальне потепління. Спалювання вугілля є джерелом найбільшої кількості викидів CO_2 на одиницю виробленої енергії, тоді як природний газ - найменшого. Використання сучасних технологій, таких як уловлювання та зберігання вуглецю (CCS), може зменшити негативний вплив на довкілля.

Таблиця 2.4 - Порівняння викидів CO_2 для різних палив

Пальне	Викиди CO_2, кг/ГДж
Вугілля	95–110
Нафта	70–80
Природний газ	50–60

Вугілля, нафта та природний газ залишаються важливими джерелами енергії у світовій економіці завдяки їх високій теплотворній здатності,

доступності та розвитку технологій використання. Водночас їх застосування пов’язане з екологічними викликами, що стимулює розвиток технологій зниження шкідливих викидів. Для забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору необхідно враховувати як теплофізичні характеристики цих палив, так і їх вплив на довкілля.

2.2 Порівняльний аналіз теплофізичних характеристик

Порівняльний аналіз теплофізичних характеристик різних паливних матеріалів є важливим етапом дослідження їх енергетичного потенціалу. Водень, сірководень, азот та біопаливо представляють різні класи палив, що відрізняються за своїми теплофізичними властивостями, способами зберігання, транспортування та впливом на навколишнє середовище. Аналіз цих параметрів дозволяє обґрунтувати вибір палива для різних галузей енергетики, з урахуванням економічної доцільності, технологічних особливостей та екологічних вимог.

Теплотворна здатність палива визначає кількість енергії, що виділяється під час його згоряння. Водень має найвищу теплотворну здатність серед досліджуваних палив (141.9 МДж/кг), що робить його перспективним для використання у високоефективних енергетичних установках. Сірководень поступається водню за цим показником, але має перевагу через наявність у відходах промисловості. Азот, як паливо, використовується нечасто, а його функції в енергетичних процесах обмежуються роллю теплоносія. Біопаливо варіюється за теплотворною здатністю залежно від складу, але зазвичай воно менш ефективне порівняно з викопними паливами.

Таблиця 2.5 - Теплотворна здатність паливних матеріалів

Тип палива	Теплотворна здатність, МДж/кг

Водень	141.9
Сірководень	58.0
Біопаливо (середнє)	20.0–30.0
Природний газ	55.0

Висока теплотворна здатність водню дозволяє використовувати його для створення компактних і потужних енергетичних систем. Водночас, біопаливо виступає екологічною альтернативою, хоча його ефективність обмежена.

Теплопровідність палива визначає швидкість передачі тепла у процесах згоряння та тепловідведення. Водень має низьку теплопровідність (0.180 Вт/(м·К)), що ускладнює його застосування в умовах, де потрібен інтенсивний теплообмін. Сірководень та біопаливо мають теплопровідність, що відповідає середньому рівню серед рідких і газоподібних палив, що спрощує їх використання у стандартних теплотехнічних системах

Таблиця 2.6 - Теплопровідність і теплоємність палив

Тип палива	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, Дж/(кг·К)
Водень	0.180	14,30
Сірководень	0.200	1,38
Біопаливо (середнє)	0.150	1,75
Природний газ	0.160	2,22

Азот, що використовується як теплоносій, має високу теплоємність і низьку теплопровідність, що робить його ефективним у спеціальних системах, але обмежує використання в традиційних енергетичних установках.

Температури плавлення та кипіння визначають можливості зберігання, транспортування та використання палива в різних температурних умовах. Водень характеризується надзвичайно низькою температурою кипіння (-252.87°C), що потребує створення кріогенних умов для його зберігання. Сірководень має температуру кипіння вищу, що спрощує його використання, хоча його токсичність залишається основним бар'єром. Біопаливо має широкий діапазон температур кипіння і плавлення залежно від форми (рідке, тверде чи газоподібне).

Таблиця 2.7 - Температури плавлення та кипіння палив

Тип палива	Температура плавлення, °C	Температура кипіння, °C
Водень	-259.16	-252.87
Сірководень	-85.5	60.4
Біопаливо (середнє)	-15	180
Природний газ	-182.5	-161.5

Такі температурні характеристики визначають, які інфраструктурні рішення потрібні для безпечного та ефективного використання цих палив.

Екологічна безпека палива пов'язана не лише з його теплотворною здатністю, але й з його теплофізичними властивостями. Водень є одним із найекологічніших видів палива, оскільки його згоряння $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$призводить до утворення лише води. Біопаливо також має низький рівень викидів вуглекислого газу, оскільки його виготовлення базується на використанні біомаси, що поглинає CO_2. Сірководень є більш проблемним через токсичність продуктів його згоряння.

Порівняльний аналіз теплофізичних характеристик демонструє, що кожне паливо має свої переваги та недоліки. Водень характеризується високою теплотворною здатністю та екологічністю, але його зберігання та транспортування є технологічно складними. Сірководень і біопаливо пропонують компроміс між енергетичною ефективністю та простотою використання, але потребують додаткових заходів для мінімізації екологічного впливу. Азот, хоча і не є паливом у традиційному розумінні, має унікальні теплофізичні властивості, що робить його ефективним теплоносієм у спеціалізованих системах. Для розширення застосування цих палив необхідні подальші дослідження їх теплофізичних характеристик у різних умовах.

РОЗДІЛ 3. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕТРАДИЦІЙНИХ ПАЛИВ

3.1 Водень як паливо: фізико-хімічні властивості, теплотворна здатність

Водень є одним із найбільш перспективних енергоносіїв, здатних задовольнити сучасні потреби в екологічно чистих та високоефективних джерелах енергії. Унікальні фізико-хімічні властивості водню роблять його привабливим як для традиційних, так і для інноваційних енергетичних систем. Цей розділ аналізує ключові фізико-хімічні характеристики водню, його теплотворну здатність та роль у сучасних енергетичних процесах.

Водень - найпростіший і найпоширеніший хімічний елемент у Всесвіті. Він має атомний номер 1, а його молекулярна форма (H_2) є основною формою існування на Землі. Водень відрізняється низкою унікальних фізичних і хімічних властивостей, що визначають його застосування в енергетичних процесах.

Фізичні характеристики водню включають низьку молекулярну масу (2,016 г/моль) та високу летючість. При нормальних умовах водень є безбарвним і беззапахним газом, що має надзвичайно низьку щільність - 0,08988 кг/м³ при 0°C і 1 атм. Такі властивості сприяють широкому застосуванню водню, але створюють складнощі з його зберіганням та транспортуванням, адже він легко просочується через стінки резервуарів.

Таблиця 3.1. Основні фізичні характеристики водню

Параметр	Значення
Молекулярна маса	2,016 г/моль
Щільність (при 0°C, 1 атм)	0,08988 кг/м³
Температура кипіння	-252,87°C

Температура плавлення	-259,16°C
Теплопровідність	0,180 Вт/(м·К)

Хімічні властивості водню визначаються його високою реакційною здатністю. У чистому вигляді водень є дуже горючим і має широкий діапазон займання у повітрі - від 4 до 75% об'ємної концентрації. Висока енергія зв'язку (435 кДж/моль для H–H) та висока температура полум'я (близько 2100°C) роблять його ефективним паливом для різних енергетичних систем.

Однією з ключових характеристик водню як палива є його висока теплотворна здатність. Водень має найвищу теплотворну здатність серед усіх відомих хімічних палив - 141,9 МДж/кг для вищої теплотворної здатності та 119,9 МДж/кг для нижчої. Така висока енергоефективність забезпечує водню конкурентоспроможність у порівнянні з традиційними викопними паливами.

Теплотворна здатність водню значно перевищує показники інших видів палива. Наприклад, теплотворна здатність природного газу становить близько 55 МДж/кг, а бензину - близько 47 МДж/кг. Це означає, що водень може забезпечити вдвічі більший вихід енергії на одиницю маси, ніж традиційні вуглеводневі палива.

Таблиця 3.2 - Порівняння теплотворної здатності водню з іншими видами палива

Тип палива	Вища теплотворна здатність, МДж/кг	Нижча теплотворна здатність, МДж/кг
Водень	141,9	119,9
Природний газ	55,0	50,0
Бензин	47,2	44,0
Біодизель	37,8	36,0

Ці значення підтверджують, що водень є надзвичайно енергомістким паливом, що робить його привабливим для застосування в системах з високими вимогами до ефективності, таких як авіація, ракетна техніка та водневі паливні елементи.

Завдяки своїм теплофізичним властивостям водень використовується в багатьох галузях енергетики. Одним із ключових напрямків є застосування водню в паливних елементах. Паливні елементи забезпечують безпосереднє перетворення хімічної енергії водню в електричну з мінімальними втратами тепла. Такі системи характеризуються високою ефективністю (до 60%) і екологічністю, оскільки єдиним побічним продуктом є вода.

Ще одним перспективним напрямком є використання водню як домішки в традиційних паливних сумішах. Додавання водню до природного газу, наприклад, дозволяє знизити викиди вуглекислого газу та збільшити загальну теплотворну здатність суміші.

Слід зазначити, що використання водню вимагає спеціальної інфраструктури для його зберігання та транспортування. Високий рівень летючості водню та низька температура кипіння вимагають розробки кріогенних систем або використання високого тиску для зберігання у газоподібному вигляді. Крім того, водень легко проникає через метали, спричиняючи ефект водневої крихкості, що ставить додаткові вимоги до матеріалів інфраструктури.

Водень є екологічно чистим паливом, яке при згорянні утворює лише воду. Це дозволяє суттєво знизити викиди парникових газів, особливо якщо водень виробляється за допомогою відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна або вітрова енергія. Застосування водню може стати важливим кроком до зменшення залежності від викопного палива та переходу до "зеленої" енергетики.

Фізико-хімічні властивості та висока (120-142 МДж/кг) теплотворна здатність водню роблять його одним із найперспективніших палив для

сучасної енергетики. Незважаючи на технічні виклики, пов’язані зі зберіганням та транспортуванням, водень вже знаходить застосування у високотехнологічних галузях, таких як паливні елементи та домішки до традиційних видів палива. Його екологічні переваги сприяють формуванню енергетичної системи майбутнього, орієнтованої на сталий розвиток та мінімізацію впливу на навколишнє середовище.

3.2 Сірководень в контексті енергетичних технологій

Сірководень (H_2S) є природним газом з різким запахом, який в умовах сучасної енергетики розглядається як перспективне джерело енергії. Це пояснюється його широкою доступністю, значною теплотворною здатністю та можливістю отримання в рамках комплексних технологічних процесів. Крім того, використання сірководню як енергетичного ресурсу сприяє вирішенню екологічних проблем, зокрема шляхом зниження викидів токсичних речовин у довкілля.

Сірководень утворюється у природних умовах під час біохімічного розкладання органічних матеріалів, зокрема в болотах, гарячих джерелах і вулканічних районах. Також він видобувається як побічний продукт в процесах переробки нафти і природного газу, а також у хімічній промисловості.

Сірководень є токсичним і корозійно активним газом, тому його використання вимагає особливих заходів безпеки. Характерною властивістю сірководню є його відносно висока теплотворна здатність — близько 58 МДж/кг. Це робить його придатним для застосування в різноманітних енергетичних установках.

Теплофізичні характеристики сірководню в різних температурних умовах наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Теплофізичні властивості сірководню

Параметр	Значення
Молекулярна маса, г/моль	34.08
Температура кипіння, °C	60.4
Теплотворна здатність, МДж/кг	58.0
Щільність при 20°C, кг/м³	1.54
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0.200

Фізико-хімічні характеристики сірководню визначають його потенціал для застосування в енергетиці, зокрема в процесах виробництва теплової та електричної енергії.

Однією з головних причин зацікавлення сірководнем є його використання як джерела водню та сірки. Водень, отриманий із сірководню, може бути використаний як високоефективне паливо в різних сферах енергетики. Основним методом перетворення сірководню є термічний або каталізаторний розклад, який дозволяє виділити водень і сірку як окремі продукти.

В умовах сучасних технологій розглядаються такі основні напрямки використання сірководню:

- Отримання водню. Термоліз сірководню є перспективною технологією, яка дозволяє отримувати високоякісний водень. Процес може проводитися при високих температурах (700–1000°C) у спеціально розроблених реакторах.
- Виробництво енергії. Сірководень можна спалювати в котлах для виробництва теплової енергії, хоча цей підхід супроводжується значним утворенням токсичних оксидів сірки.
- Перспективні методи використання. Технології паливних елементів на основі сірководню розробляються з метою зниження викидів і підвищення ефективності енергетичних процесів.

Процеси, пов'язані з використанням сірководню, характеризуються високою технологічною складністю. Основні труднощі включають: токсичність газу, корозію обладнання, значні енергетичні витрати на переробку. Водночас сучасні розробки спрямовані на оптимізацію цих процесів, зокрема шляхом використання спеціальних матеріалів для трубопроводів і реакторів, а також застосування новітніх каталітичних систем.

Таблиця 3.4 - Основні технології використання сірководню

Технологія	Продукти процесу	Переваги	Обмеження
Термоліз	Водень, сірка	Екологічність, чистота водню	Висока температура
Каталітичний розклад	Водень, сірка	Ефективність	Висока вартість каталізаторів
Спалювання	Теплова енергія	Простота	Викиди SOx
Паливні елементи	Електроенергія	Низькі викиди, ефективність	Розробка на ранній стадії

Розвиток цих технологій відкриває перспективи широкого впровадження сірководню в енергетичні процеси.

Однією з основних переваг використання сірководню є можливість мінімізації його викидів у природне середовище. У традиційній промисловості сірководень часто вважається відходом, що підлягає утилізації. Використання цього газу для отримання енергії чи корисних хімічних сполук дозволяє зменшити негативний вплив на екосистеми.

Втім, спалювання сірководню супроводжується утворенням оксидів сірки (SOx), які є одними з головних джерел кислотних дощів. Тому розвиток екологічно чистих технологій, таких як каталітичний розклад, є надзвичайно важливим.

Особливої уваги потребують питання безпеки при транспортуванні і зберіганні сірководню. Газ є вкрай токсичним, і навіть його низькі концентрації можуть спричиняти серйозні проблеми для здоров’я. Використання герметичних систем і вдосконалення методів моніторингу є необхідними заходами для забезпечення безпеки.

Використання сірководню в енергетичних технологіях економічно виправдане в регіонах, де є його природні джерела або доступні промислові потоки, що містять H_2S. Зокрема, нафтогазова промисловість, яка часто стикається з проблемою утилізації сірководню, може отримати вигоду від його переробки.

Застосування сірководню для отримання водню може стати економічно ефективною альтернативою іншим методам водневої енергетики. Проте висока вартість обладнання та технологій залишається бар'єром для широкомасштабного впровадження.

Сірководень має значний потенціал у контексті енергетичних технологій завдяки своїй доступності, теплотворній здатності та можливості переробки в цінні продукти, такі як водень і сірка. Його використання може сприяти як підвищенню енергетичної ефективності, так і зниженню екологічного навантаження. Однак технологічна складність процесів і необхідність забезпечення високого рівня безпеки є основними викликами для його впровадження.

3.3 Азот як компонент у паливних системах

Азот відіграє важливу роль у багатьох аспектах енергетики, включаючи використання його як компонента паливних систем. Це один із найпоширеніших хімічних елементів на Землі, що становить майже 78% атмосфери. Незважаючи на те, що азот є інертним газом у звичайних умовах, у певних технологічних процесах він виконує ключові функції, забезпечуючи підвищення ефективності, безпеки та екологічності паливних систем.

Азот має низку фізико-хімічних властивостей, які роблять його корисним у паливних системах. Він є газом без кольору, запаху та смаку, має низьку густину і високу здатність до охолодження в зрідженому стані. Завдяки високій хімічній інертності в звичайних умовах азот часто використовується як захисне середовище для уникнення небажаних хімічних реакцій.

Таблиця 3.5 - Основні фізико-хімічні характеристики азоту

Параметр	Значення
Хімічна формула	N_2
Молярна маса, г/моль	28.0134
Температура кипіння, °C	-195.79
Температура плавлення, °C	-210.0
Густина при 1 атм і 0°C, кг/м³	1.2506
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0.02583

Низька теплопровідність азоту дозволяє використовувати його в системах, де потрібна ізоляція тепла, наприклад, у кріогенних технологіях. У зрідженому вигляді азот застосовується як охолоджувач у промислових та енергетичних системах.

Азот, присутній в атмосферному повітрі, впливає на процес горіння палив. Хоча він не бере участі у хімічній реакції горіння як окисник, він абсорбує частину тепла і може впливати на ефективність згоряння. У деяких випадках азот утворює оксиди азоту (NOx), які є шкідливими для

навколишнього середовища. Тому у сучасній енергетиці застосовуються спеціальні технології для мінімізації утворення NOx, зокрема:

- використання низькотемпературного згоряння;
- впровадження каталітичних конвертерів;
- додавання рециркуляційного азоту для зниження температури горіння.

Такі підходи дозволяють зменшити викиди NOx без втрати ефективності процесів.

Однією з найважливіших сфер застосування азоту є його використання як кріогенного охолоджувача. Зріджений азот (LN_2) широко використовується для охолодження компонентів у високотемпературних енергетичних установках, таких як турбіни, теплообмінники та системи зберігання зріджених газів. Його низька температура кипіння (-195.79°C) забезпечує ефективне охолодження навіть в екстремальних умовах.

Таблиця 3.6 - Порівняння характеристик зріджених охолоджувачів

Параметр	Азот (N_2)	Гелій (He)	Водень (H_2)
Температура кипіння, °C	-195.79	-268.93	-252.87
Густина, кг/м³	0.808	0.125	0.071
Теплоємність, Дж/(кг·К)	1040	5193	10120

Азот вигідно відрізняється від інших кріогенних речовин, таких як гелій чи водень, своєю доступністю, низькою вартістю і менш вимогливими умовами зберігання.

Азот часто додають до палив у формі стисненого газу або інертної домішки. Наприклад, у газотурбінних установках суміш азоту і водню може знижувати ризики вибуху, забезпечуючи стабільність горіння. Крім того, азот виконує роль буфера, контролюючи температуру в камері згоряння.

Азот також використовується у паливних елементах. Наприклад, у водневих паливних елементах азот може стабілізувати процес електрохімічного окислення, забезпечуючи рівномірне надходження водню та кисню до каталізатора.

Хоча азот є екологічно нейтральним газом, його використання у паливних системах може опосередковано впливати на довкілля. Утворення оксидів азоту є основною екологічною проблемою, пов’язаною з азотом у енергетиці. Для зниження впливу використовуються сучасні технології контролю викидів, які дозволяють зменшити концентрацію NOx у відхідних газах до мінімального рівня.

Одним із перспективних напрямків є впровадження систем із замкненим циклом, де азот використовується повторно, зменшуючи потребу у нових обсягах ресурсу і мінімізуючи шкідливі викиди.

Азот є незамінним компонентом у багатьох паливних системах завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, доступності та універсальності. Його використання в якості охолоджувача, буферного газу чи інертної домішки забезпечує підвищення ефективності та безпеки енергетичних процесів. Однак для зменшення негативного впливу на довкілля необхідно впроваджувати новітні технології контролю утворення оксидів азоту та покращення використання азоту у замкнених циклах. Азот, будучи простим за своєю природою, відкриває складні і водночас перспективні шляхи розвитку сучасної енергетики.

3.4 Біопаливо: види, властивості, перспективи використання

Біопаливо є одним із найбільш перспективних альтернативних джерел енергії, що сприяє зменшенню залежності від викопних палив та зниженню рівня шкідливих викидів у довкілля. Його виробляють із відновлюваних біологічних ресурсів, таких як рослинна біомаса, відходи сільського господарства, тваринницька продукція та органічні залишки. Залежно від

технології виробництва, сировини та фізико-хімічних властивостей, біопаливо поділяється на різні види, кожен з яких має специфічні теплофізичні характеристики та сфери застосування.

Виробництво та використання біопалива включає декілька основних категорій, таких як біодизель, біоетанол, біогаз та тверда біомаса. Кожен вид має свої особливості, які визначають його теплофізичні характеристики, економічну доцільність і екологічний вплив.

Біодизель виробляється переважно з рослинних олій (соняшникової, ріпакової, пальмової) шляхом хімічного процесу естерифікації. Його основними перевагами є висока теплотворна здатність, екологічність та сумісність з традиційними дизельними двигунами.

Біоетанол отримується з рослин, що містять цукор або крохмаль (кукурудза, тростина, пшениця), шляхом бродіння. Він використовується як добавка до бензину, що покращує згорання палива та зменшує викиди вуглекислого газу.

Біогаз утворюється внаслідок анаеробного розкладу органічних відходів та сільськогосподарської біомаси. Його основними компонентами є метан і вуглекислий газ, що робить його ефективним для використання у генерації електроенергії та тепла.

Тверда біомаса, до якої відносяться деревина, пелети, торф, використовується у традиційних котлах та промислових установках для отримання тепла.

Таблиця 3.7 - Теплофізичні властивості основних видів біопалива

Вид біопалива	Теплотворна здатність, МДж/кг	Щільність, кг/м³	Екологічність
Біодизель	38.0	860	Висока
Біоетанол	27.0	789	Середня
Біогаз	22.0	—	Висока

Тверда біомаса	18.0–20.0	600–800	Середня

Основні теплофізичні властивості біопалива визначають його придатність для різних видів енергетичних процесів. До них належать теплотворна здатність, температура займання, теплопровідність і теплоємність.

Біодизель має показники, близькі до звичайного дизельного палива, що робить його привабливим для транспорту. Завдяки високій температурі займання, біодизель знижує ризик виникнення аварій у процесі транспортування та зберігання. Біоетанол, хоча й має нижчу теплотворну здатність, компенсує цей недолік своїми відновлюваними властивостями та низьким рівнем токсичності.

Біогаз є привабливим завдяки його можливості прямого використання для виробництва електроенергії. Низька теплопровідність твердих біомас ускладнює їхнє використання у високотехнологічних установках, однак вони залишаються популярними у традиційному опаленні.

Таблиця 3.8 - Теплофізичні характеристики біопалива

Вид біопалива	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Температура займання, °C
Біодизель	0.25	2100	180
Біоетанол	0.17	2000	13
Біогаз	0.015	1950	700
Тверда біомаса	0.12	1600	300

Використання біопалива має численні перспективи, пов’язані з енергетичною незалежністю, відновлюваністю сировини та зменшенням викидів парникових газів. Біодизель і біоетанол особливо перспективні для

транспортного сектору, оскільки їх можна використовувати в існуючих двигунах з мінімальними модифікаціями.

Розвиток технологій анаеробного бродіння відкриває нові можливості для ефективного використання біогазу, зокрема у малих господарствах і промислових електростанціях. Сучасні дослідження спрямовані на покращення методів виробництва біогазу, зокрема для зменшення викидів сірководню, який часто є небажаним побічним продуктом.

Для твердих біомас важливим аспектом є їхня доступність у регіонах із великою кількістю лісових ресурсів. Застосування пелет та брикетів, виготовлених із залишків деревини, дозволяє зменшити витрати на опалення.

Однак існують і виклики, пов’язані з використанням біопалива. Зокрема, виробництво біоетанолу може конкурувати за ресурси з харчовою промисловістю, а застосування біодизелю іноді стикається з проблемами масштабованості виробництва.

Біопаливо є перспективним джерелом енергії, що має потенціал значно скоротити залежність від викопних палив. Різноманітність видів, таких як біодизель, біоетанол, біогаз і тверда біомаса, дозволяє адаптувати його використання до конкретних потреб енергетичних систем. Подальший розвиток технологій виробництва та покращення теплофізичних характеристик біопалива сприятиме його більш широкому впровадженню та підвищенню ефективності в енергетичному секторі.

РОЗДІЛ 4. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЛИВА ДЛЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

4.1 Властивості ядерного палива

Ядерне паливо відіграє ключову роль у виробництві енергії на атомних електростанціях (АЕС), де воно використовується для ініціювання та підтримки ядерних реакцій, що призводять до виділення значної кількості тепла, яке потім перетворюється на електричну енергію. Властивості ядерного палива мають суттєвий вплив на ефективність роботи реактора, безпеку експлуатації, а також на процеси зберігання та утилізації відходів. Вибір ядерного палива визначається його здатністю до ядерних реакцій, теплопередачі, довговічності та стабільності в умовах високих температур і радіаційного впливу.

У цьому розділі буде розглянуто основні фізико-хімічні та теплофізичні властивості ядерного палива, зокрема урану, плутонію та торію, а також їхні особливості в контексті використання в ядерних реакторах.

Основними типами ядерного палива є уран (як уран-235 або уран-238), плутоній (особливо плутоній-239) та торій. Уран-235 є найбільш поширеним видом палива, що використовується в сучасних реакторах. Це ізотоп, здатний до поділу, що ініціює ядерні реакції. У реакторах також використовується збагачений уран, де вміст урану-235 збільшений порівняно з природним ураном.

У реакторах на швидких нейтронах використовуються паливні елементи, що містять плутоній або торій. Плутоній-239, як і уран-235, здатний до поділу, а торій-232 може бути перетворений на уран-233, який є подільним матеріалом. Торій має ряд переваг, зокрема менше радіоактивних відходів порівняно з ураном і плутонієм.

Теплофізичні властивості ядерного палива визначають його здатність до ефективної теплопередачі, що має важливе значення для стабільної роботи

ядерного реактора. Серед основних теплофізичних властивостей ядерного палива можна виділити теплопровідність, теплоємність та теплотворну здатність.

Теплопровідність є важливою характеристикою, оскільки вона визначає здатність палива передавати тепло від зони ядерної реакції до теплоносія, який у свою чергу передає тепло в турбіну. Уран та його з'єднання мають досить високу теплопровідність, що сприяє ефективному відведенню тепла. Плутоній і торій мають дещо нижчу теплопровідність, що вимагає особливої уваги при розробці паливних елементів для таких реакторів.

У реакторах теплоносіями можуть виступати як звичайна вода H_2O так і важка вода D_2O, де D це ізотоп водню, дейтерій, іноді можуть бути деякі гази та різні рідини, які задовільняють потребам цього типу реакктора.

Теплоємність ядерного палива також є важливим параметром, оскільки вона визначає кількість тепла, яку може акумулювати матеріал без різкого підвищення температури. Висока теплоємність палива дозволяє стабільніше підтримувати температурний режим в реакторі.

Теплотворна здатність характеризує кількість тепла, що вивільняється під час ядерного поділу в уранових або плутонієвих ядрах. Для урану-235 теплотворна здатність становить близько 200 МДж/кг, для плутонію-239 – близько 210 МДж/кг.

Таблиця 4.1 - Теплофізичні властивості різних типів ядерного палива

Тип палива	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, Дж/(кг·К)	Теплотворна здатність, МДж/кг
Уран-235	30–35	0.23–0.35	200
Плутоній-239	20–25	0.26–0.34	210

Торій-232	22–30	0.30–0.37	150

Ці показники підтверджують, що хоча теплотворна здатність урану та плутонію дуже висока, необхідність у постійному відведенні тепла з реактора потребує додаткових заходів для забезпечення стабільної роботи.

Механічні властивості ядерного палива, зокрема його міцність, стійкість до корозії та деформацій, мають важливе значення для довговічності паливних елементів. Протягом експлуатації палива в ядерних реакторах відбуваються значні зміни в його структурі, викликані радіаційним і тепловим навантаженням. Підвищення температури і тривале радіаційне опромінення можуть призвести до механічних пошкоджень паливних елементів, що значно знижує їх ефективність.

Наприклад, при експлуатації уранових паливних стрижнів у ядерних реакторах може відбуватися процес деградації матеріалу під дією високих температур та радіаційного впливу, що призводить до утворення мікротріщин. Для поліпшення механічної міцності і зменшення ризику пошкоджень застосовуються спеціальні металеві оболонки, які повинні бути стійкими до високих температур і корозії.

Хімічна стійкість палива є важливим аспектом для його використання в енергетичних процесах. Уран та плутоній, як основні ядерні матеріали, схильні до окиснення, особливо при високих температурах. Окиснення може призвести до утворення різних оксидів, що знижує ефективність ядерної реакції. Тому паливо повинно бути захищене від окиснення за допомогою спеціальних оболонок або бар'єрних матеріалів.

Урановий діоксид (UO_2), що є основною формою уранового палива, має хорошу хімічну стабільність, однак при високих температурах може реагувати з водою, утворюючи гідроксиди та водень, що є потенційно небезпечними для безпеки реактора.

Таблиця 4. 2 - Хімічні властивості ядерного палива

Тип палива	Хімічна формула	Стійкість до окиснення	Потенційні реакції
Уран (UO_2)	UO_2	Висока	Взаємодія з водою при високих температурах
Плутоній (PuO_2)	PuO_2	Помірна	Реакція з водою, утворення гідроксидів
Торій (ThO_2)	ThO_2	Висока	Залишкова активність після реакцій

Експлуатаційні властивості ядерного палива визначають його здатність до тривалої роботи в умовах високих температур, радіаційного навантаження та термічних циклів, що виникають під час роботи реактора. Залежно від типу реактора (водно-водяний, газовий, швидкий нейтронний) вимоги до палива можуть значно варіюватися. Водночас усі типи палива повинні забезпечувати стабільну ядерну реакцію без ризику аварійних ситуацій, таких як перегрів або пошкодження паливних елементів.

Особливо важливою є стійкість палива до радіаційного зношення, що може призводити до змін у його хімічному складі, структурі та механічних властивостях. Для забезпечення безпеки на тривалий час проводиться регулярна заміна палива і моніторинг його стану.

Властивості ядерного палива визначають не тільки його ефективність в енергетичних процесах, але й його вплив на безпеку та надійність роботи ядерних установок. Теплофізичні та механічні характеристики, хімічна стійкість і здатність до тривалої експлуатації без істотних змін є важливими параметрами при виборі палива для різних типів ядерних реакторів. Оскільки

ядерна енергетика має велике майбутнє в плані зменшення викидів парникових газів і забезпечення сталого енергопостачання, постійні наукові дослідження в галузі ядерного палива є необхідними для розвитку цієї галузі.

4.2 Теплофізичні характеристики матеріалів для теплообмінників та конструкцій реакторів

У сучасній енергетиці, зокрема в атомній енергетиці, теплообмінники та конструкції реакторів є критично важливими елементами, які забезпечують безпеку та ефективність енергетичних процесів. Вибір матеріалів для цих конструкцій має вирішальне значення для забезпечення стабільної роботи атомних електростанцій, а також інших енергетичних установок, що використовують високі температури та тиски. Важливою умовою для вибору матеріалів є їх теплофізичні характеристики, які впливають на ефективність теплообміну, стійкість до високих температур і корозії, а також на їх здатність витримувати великі механічні навантаження.

У цьому розділі буде розглянуто ключові теплофізичні характеристики матеріалів, які використовуються для виготовлення теплообмінників і конструкцій реакторів, зокрема теплопровідність, теплоємність, температура плавлення та кипіння, а також стійкість до термічного розширення і корозії. Також буде здійснено порівняння характеристик різних матеріалів, таких як сталі, сплави, керамічні матеріали та композити.

Теплопровідність є однією з найважливіших характеристик матеріалів, що використовуються у теплообмінниках. Вона визначає здатність матеріалу передавати теплоту від одного середовища до іншого. Для теплообмінників, що використовуються в ядерних реакторах та інших енергетичних установках, дуже важливою є висока теплопровідність, щоб забезпечити ефективне охолодження активних зон реактора.

Наприклад, для теплообмінників, що використовують водяні або газові теплоносії, матеріали повинні мати високу теплопровідність для швидкого

відведення тепла від гарячих елементів до охолоджуючих. Однак важливо також враховувати вплив температури та інших факторів на теплопровідність матеріалу. Для використання в реакторах часто застосовуються спеціальні сплави, які мають стабільну теплопровідність при високих температурах.

Таблиця 4.3 - Теплопровідність матеріалів для теплообмінників

Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м·К)
Нержавіючі сталі	15–25
Молібденові сталі	30–50
Титанові сталі	7-25
Керамічні матеріали	1–10
Нікелеві сталі	20-40

Як наведено у таблиці, молібденові сталі та нікелеві сталі являються найбільш ефективними з точки зору теплоємності, але крихкість молібденових сплавів при низьких температурах не дає плюсів. Нікелеві сталі також мають високу теплоємність та гарно переносять корозію та окислення, але висока ціна стає проблемою.

Теплоємність матеріалу визначає кількість тепла, яку матеріал може поглинути без значного підвищення температури. Вибір матеріалів для конструкцій реакторів включає не тільки їх здатність до швидкого відведення тепла, але й здатність акумулювати тепло, щоб зменшити температурні коливання в критичних зонах реактора.

Матеріали, які використовуються в конструкціях реакторів, повинні мати помірну теплоємність, щоб запобігти перегріву активних зон і забезпечити рівномірний тепловий потік. Важливою характеристикою є також стабільність теплоємності при різних температурах.

Таблиця 4.4 - Теплоємність матеріалів для конструкцій реакторів

Матеріал	Теплоємність, Дж/(кг·К)
Нержавіючі сталі	450–500
Молібденові сталі	450-500
Титанові сталі	520-550
Керамічні матеріали	800–1000
Нікелеві сталі	460–520

Титанові сталі і керамічні матеріали мають вищу теплоємність, що дозволяє їм зберігати більше тепла, однак їх механічні властивості при високих температурах можуть обмежувати їх використання у високонавантажених конструкціях реакторів.

Температури плавлення та кипіння визначають здатність матеріалів витримувати екстремальні умови без втрати їх структурних і теплофізичних властивостей. У енергетичних системах, особливо в атомних реакторах, температура в активній зоні може перевищувати 1000°C, тому вибір матеріалів з високими температурами плавлення є критично важливим.

Теплостійкі матеріали, які використовуються в конструкціях реакторів, повинні витримувати температури, близькі до або навіть вищі за точки плавлення, без ризику деформації або руйнування.

Таблиця 4.5 - Температури плавлення матеріалів для конструкцій реакторів

Матеріал	Температура плавлення, °C
Нержавіючі сталі	1375–1450
Молібденові сталі	1300–1450
Титанові сталі	1600–1700

Керамічні матеріали	1500–2200
Нікелеві сталі	1400–1500

З таблиці видно, що керамічні матеріали та сплави на основі титану мають найвищі температури плавлення, що робить їх ідеальними для використання в умовах високих температур.

Однією з важливих характеристик матеріалів для теплообмінників та конструкцій реакторів є їх здатність витримувати зміни температури без значного термічного розширення, що може призвести до тріщин або деформацій. Матеріали з низьким коефіцієнтом теплового розширення менш схильні до змін форми під впливом температурних коливань, що важливо для забезпечення стабільності роботи реакторів і теплообмінних систем.

Корозійна стійкість матеріалів також є критичним фактором, особливо при високих температурах та в агресивних середовищах, таких як пари води, кисень або радіоактивні продукти. Для забезпечення довговічності і безпеки матеріали повинні бути стійкими до корозії, особливо в умовах високих температур.

Таблиця 4.6 - Коефіцієнти термічного розширення матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт термічного розширення, 10^{-6}/°C
Нержавіючі сталі	16–18
Молібденові сталі	10–14
Титанові сталі	8-10
Керамічні матеріали	1–2
Нікелеві сталі	12-15

Матеріали з меншим коефіцієнтом розширення, такі як титан і кераміка, забезпечують більшу стабільність конструкцій реакторів, проте вони мають інші обмеження в механічних властивостях.

У виборі матеріалів для теплообмінників і конструкцій реакторів важливо враховувати не тільки теплофізичні властивості, але й їх здатність витримувати екстремальні умови роботи, зокрема високі температури, механічні навантаження і корозію. Матеріали, такі як сплави на основі нікелю, керамічні матеріали та титан, мають високі теплофізичні характеристики і можуть бути використані в найскладніших умовах енергетичних процесів. Однак їх висока вартість і деякі обмеження в механічних властивостях вимагають розробки нових матеріалів і технологій для забезпечення стабільної і безпечної роботи сучасних енергетичних систем.

РОЗДІЛ 5. ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ПАЛИВ

5.1 Вплив на навколишнє середовище

Забруднення навколишнього середовища та зміни клімату є одними з найбільших глобальних проблем, що виникають через діяльність людини, зокрема внаслідок використання традиційних паливних матеріалів. Це стосується не тільки продуктів спалювання, таких як вуглекислий газ (CO_2), оксиди азоту (NOx) та сірки (SOx), а й тих, які походять від виробництва та транспортування палива, таких як хімічні відходи, викиди в повітря та водні ресурси. Відтак, розуміння впливу різних паливних матеріалів на навколишнє середовище має важливе значення для зменшення екологічних наслідків і переходу до сталого розвитку енергетики.

Використання традиційних видів палива, таких як вугілля, нафта та природний газ, є основним джерелом забруднення навколишнього середовища. Під час їх спалювання утворюються значні обсяги викидів, які сприяють глобальним змінам клімату. Зокрема, викиди CO_2 сприяють парниковому ефекту та підвищенню середньої температури планети, що має катастрофічні наслідки для екосистем і людства в цілому.

Надмірне споживання викопних видів палива також призводить до забруднення водних ресурсів і ґрунтів. Окремі речовини, що потрапляють до водних систем під час видобутку і транспортування палива, можуть мати токсичний вплив на флору і фауну. Викиди сірководню, аміаку та інших токсичних сполук у результаті спалювання вугілля або нафти мають шкідливий вплив на здоров’я людини та біорізноманіття.

Важливими є й інші аспекти, такі як вплив видобутку палива на ландшафти, забруднення повітря пилом та іншими дрібними частками, що підвищує рівень смертності від респіраторних захворювань.

Таблиця 5.1 - Викиди основних забруднювачів при спалюванні різних видів палива

Пальне	Викиди CO_2 (г/кВт·год)	Викиди SO_2 (г/кВт·год)	Викиди NOx (г/кВт·год)
Вугілля	820	2.1	0.9
Природний газ	450	0.1	0.5
Нафта	750	1.5	1.0
Біомаса	200	0.0	0.4

З даної таблиці видно, що викиди CO_2 при спалюванні вугілля і нафти є значно більшими, ніж при спалюванні біомаси або природного газу. Це підтверджує важливість переходу до більш екологічно чистих джерел енергії для зменшення впливу на навколишнє середовище.

Альтернативні палива, такі як водень, біопаливо та сірководень, мають потенціал значно зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Проте, хоча їх вплив є меншим у порівнянні з традиційними матеріалами, важливо враховувати ряд факторів, які можуть негативно вплинути на екологію.

Водень є одним з найбільш перспективних видів палива, оскільки його спалювання не викликає викидів вуглекислого газу або інших шкідливих газів. Проте, його виробництво за допомогою традиційних методів, таких як парова конверсія метану, може спричиняти викиди CO_2. Важливим аспектом є також екологічний вплив на навколишнє середовище при виробництві водню за допомогою відновлювальних джерел енергії, який суттєво менший.

Сірководень є токсичним газом, що може серйозно забруднювати атмосферу при неефективному спалюванні або недотриманні екологічних стандартів. Проте його використання як палива в енергетичних процесах на даний момент є обмеженим через високі ризики забруднення.

Біопаливо може бути більш екологічно чистим варіантом, оскільки воно є відновлювальним ресурсом. Однак важливо, щоб його виробництво не призводило до надмірного використання сільськогосподарських земель і водних ресурсів. У деяких випадках вирощування культур для біопалива може призводити до дефіциту продовольства, що є серйозною проблемою для економік, що розвиваються.

Таблиця 5.2 - Вплив використання альтернативних видів палива на навколишнє середовище

Пальне	Викиди CO_2 (г/кВт·год)	Викиди SO_2 (г/кВт·год)	Викиди NOx (г/кВт·год)
Водень	0	0	0
Біопаливо	150	0	0.4
Сірководень	100	0.1	0.3

Як видно з цієї таблиці, водень і біопаливо є більш екологічно чистими в порівнянні з традиційними видами палива, оскільки їх викиди в атмосферу значно нижчі. Проте, навіть ці альтернативи мають певний екологічний вплив, що необхідно враховувати при їх використанні.

Незалежно від того, чи мова йде про традиційні, чи альтернативні види палива, процеси їх виробництва, транспортування та зберігання можуть мати значний екологічний вплив. Видобуток викопних видів палива, таких як вугілля, нафта або природний газ, може призводити до деградації ландшафтів, забруднення водних і ґрунтових ресурсів через витоки хімічних речовин та нафтопродуктів.

Транспортування водню, зокрема, вимагає спеціальних умов, оскільки цей газ має високу схильність до витоків через його молекулярну структуру, що може призводити до забруднення атмосфери. Транспортування біопалива, залежно від виду, може також потребувати великих обсягів енергії, що, в свою

чергу, може спричинити викиди парникових газів, якщо енергія для транспортування отримана від традиційних джерел.

Забруднення повітря, води та ґрунтів внаслідок використання різних видів палива може мати серйозні наслідки для екосистем і здоров'я людини. Зокрема, викиди SO_2 та NOx, які утворюються під час спалювання викопних видів палива, є основними причинами утворення кислотних дощів, які руйнують ґрунти, водні ресурси та рослинність. Також ці викиди є основними джерелами забруднення повітря, що негативно впливає на дихальну систему людини, викликаючи астму, хронічні захворювання легень і серцево-судинні хвороби.

Біопаливо, попри те, що є відновлювальним ресурсом, також має свій екологічний слід, зокрема через необхідність використання земельних ресурсів для вирощування сировини. Вирощування культур для біопалива може спричиняти зміну ландшафтів, зниження біорізноманіття та деградацію ґрунтів.

Використання різних типів палива має суттєвий вплив на навколишнє середовище. Хоча альтернативні джерела енергії, такі як водень і біопаливо, зменшують рівень викидів парникових газів, вони не є беззастережно чистими і також мають певний екологічний вплив. Основним завданням є розвиток технологій, які дозволяють мінімізувати ці впливи, а також перехід до відновлювальних джерел енергії, які здатні зберігати екологічну рівновагу планети.

5.2 Економічні переваги та обмеження використання нетрадиційних палив

Використання нетрадиційних палив у сучасних енергетичних системах стає дедалі актуальнішим через глобальні зміни в енергетичному ландшафті. Пошук альтернатив традиційним джерелам енергії, таким як вугілля, нафта та природний газ, зумовлений потребою зменшення негативного впливу на

довкілля та залежності від обмежених ресурсів. Нетрадиційні види палива, зокрема водень, сірководень, біопаливо та інші, є важливими елементами в нових стратегіях енергетичного переходу. Однак, незважаючи на численні переваги, їх широке використання також має певні економічні обмеження, які необхідно враховувати при впровадженні в промислові та енергетичні процеси.

Перше, що варто зазначити, це те, що нетрадиційні види палива мають значний потенціал для економії та зменшення витрат на довгострокову перспективу, навіть якщо їх початкові витрати на впровадження в енергетичні системи є вищими. Ось кілька основних економічних переваг, що забезпечують їх конкурентоспроможність.

Однією з основних економічних переваг використання нетрадиційних палив є їх здатність значно знизити викиди шкідливих речовин, таких як вуглекислий газ (CO_2), оксиди азоту (NO_x) та сірчані оксиди (SO_x). Це дозволяє зменшити витрати на ліквідацію забруднення та на виконання екологічних стандартів, що поступово стають жорсткішими в багатьох країнах. Водень, наприклад, при спалюванні не виробляє вуглекислий газ, а лише водяну пару, що робить його чистим енергетичним носієм. Зниження витрат на очистку повітря і води, а також уникнення штрафних санкцій за перевищення рівня забруднення може бути суттєвим фактором для економічної вигоди в довгостроковій перспективі.

Ще однією важливою перевагою є зменшення залежності від імпорту традиційних енергоресурсів, таких як нафта, газ та вугілля. Використання місцевих джерел нетрадиційних палив дозволяє країнам знизити витрати на закупівлю енергоресурсів за кордоном, підвищуючи енергетичну безпеку. Наприклад, біопаливо може вироблятися з місцевих сільськогосподарських культур, що створює нові робочі місця та сприяє розвитку сільських територій. У випадку водню можна використовувати відновлювальні джерела енергії, що не потребують значних витрат на імпорт.

Використання нетрадиційних палив дозволяє створити більш диверсифіковану енергетичну систему, що зменшує ризики, пов’язані з коливаннями цін на традиційні енергоресурси, що є важливою економічною перевагою для країн з розвинутою економікою. Зокрема, водень може використовуватися як носій енергії для різних галузей промисловості, транспорту та житлово-комунального господарства. Різноманіття джерел енергії дає можливість розподіляти витрати і не залежати від одного виду палива.

Країни, що активно впроваджують технології на основі нетрадиційних палив, можуть отримати економічні переваги у вигляді розвитку нових високотехнологічних секторів, що сприятиме їх конкурентоспроможності на світовому ринку. Наприклад, країни, які активно розвивають водневі технології, можуть стати експортером водневих технологій і обладнання, що принесе додаткові доходи.

Незважаючи на численні переваги, використання нетрадиційних палив має і суттєві економічні обмеження, які значною мірою пов'язані з високими початковими інвестиціями та необхідністю розвивати нову інфраструктуру.

Одним із основних економічних обмежень є високі початкові витрати на розробку та впровадження технологій для використання нетрадиційних палив. Так, водневі технології, попри свою високу ефективність, потребують значних інвестицій у розбудову інфраструктури для зберігання, транспортування та переробки водню. Крім того, виробництво водню за допомогою відновлювальних джерел енергії, таких як сонце або вітер, також потребує великих капіталовкладень в установки та системи зберігання.

На початкових етапах впровадження нетрадиційних палив ефективність їх використання може бути нижчою порівняно з традиційними джерелами енергії, що обмежує економічну вигоду. Наприклад, біопаливо, навіть маючи значні переваги в екологічному плані, може виявлятися менш

економічним у порівнянні з природним газом, якщо враховувати витрати на його виробництво та транспортування.

Інфраструктура для зберігання та транспортування нетрадиційних палив, зокрема водню, не є достатньо розвинутою і потребує значних інвестицій. Водень, через свою низьку температуру кипіння, потребує спеціальних систем для зберігання та транспортування, що робить його дорогим для використання в масштабах масового виробництва енергії.

Незважаючи на переваги нетрадиційних палив, традиційні джерела енергії, зокрема природний газ та вугілля, досі залишаються більш доступними за ціною, що обмежує економічні перспективи альтернативних джерел у короткостроковій перспективі. Більшість країн, що активно розвивають нетрадиційні джерела енергії, стикаються з труднощами у забезпеченні економічної конкурентоспроможності цих технологій без державних субсидій та інших фінансових стимулів.

Виробництво біопалива стикається з проблемою масштабування через обмеженість сільськогосподарських угідь, необхідних для вирощування сировини. Висока конкуренція за землю між виробниками їжі та енергетичними компаніями може призвести до підвищення цін на сировину та в результаті — до здорожчання біопалива.

Таблиця 5.3 - Порівняння витрат на виробництво енергії з різних джерел

Тип палива	Вартість виробництва 1 МВт·год, $	Оцінка інвестиційних витрат (%)	Вартість транспортування та зберігання
Водень	80–100	70–80%	Висока (кріогенні умови)
Біопаливо (біодизель)	60–80	60–70%	Середня (транспортні витрати)

Природний газ	40–60	30–40%	Низька (розвинена інфраструктура)
Вугілля	30–50	20–30%	Низька

Ці дані підтверджують, що хоча нетрадиційні види палива мають великий потенціал для енергетичного переходу, вони стикаються з низкою економічних бар'єрів на шляху до масштабного впровадження.

Використання нетрадиційних палив має як суттєві економічні переваги, так і обмеження. Перспективи економічного розвитку в умовах глобального енергетичного переходу значною мірою залежать від здатності держав і компаній подолати ці бар'єри через інноваційні технології, вдосконалення інфраструктури та ефективне регулювання ринку енергії.

РОЗДІЛ 6. МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ПАЛИВ ДЛЯ ТРАДИЦІЙНОЇ, НЕТРАДИЦІЙНОЇ ТА АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.

6.1 Аналіз способів видобутку та отримання палив

Як ми знаємо добуток традиційних палив не являє собою складний процес, так для вугілля звичайне буріння кар'єри чи шахти, а нафти та газу буріння та установка свердловин. Коли як для нетрадиційних палив все може бути дещо складніше.

Водень можна добувати різними способами, серед яких зазвичай переважають електроліз та отримання з вуглецевих сполук.

Електроліз - це процес розкладу води з отриманням водню та кисню за допомоги електричного струму $2H_2O \rightarrow 2H2_2+O_2$. Сам процес електролізу полягає у проходженні електричного струму через електроліт(в даному випадку це вода) та утворенню водню на катоді а кисню на аноді. Катод — електрод, до якого рухаються катіони. Анод — електрод, до якого рухаються аніони.

Цей метод вже досить вивчений та легкий, ще й має досить велику енергоефективність, що дуже добре.

Отримання водню з вуглецевих сполук — це процесс при якому водень отримується з різних вуглецевих сполук але при процесі виділяється вуглекислий газ або чадний газ.

Наприклад дуже поширений метод конверсії метану, де завдяки парі виділяють водень $CH_4+H_2O \rightarrow CO+3H_2$. Як видно цей процес супроводжується великими викидами чадного газу, але завдяки поліпшенню системи буде проходити ще реакція $CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$ яка супроводжується вже викидами вуглекислого газу але дозволяє отримати більше водню.

Цей метод досить розповсюджений через, зазвичай, невелику вартість палив які в ньому використовуються та дозволяє добуток водню у промислових розмірах.

Біопаливо добувають з біомаси, тобто з відновлюваного джерела. Наприклад біодизель виробляється з рослинних олій або тваринних жирів при реакції з метанолом або етанолом в присутності каталізатора, що дозволяє виробляти це паливо майже по собівартості матеріалів. Біогаз видобувається з відстоїв органічних стоків, органічних відходів зі сміттєзвалищ та біогаз, шляхом ферментації тваринного гною або посліду.

Азот може добуватися напряму з повітря, шляхом компресії та охолодження останнього з подальшою фільтрацією.

Ядерне паливо добувається як звичайне традиційне, тобто шляхом прямого видобутку з надр землі, але потребує подальшої обробки, складнішої ніж для традиційних палив

6.2 Аналіз способів використання палив

Вугілля як традиційне паливо використовується у досить багатьох галузях нашого світу, починаючи від простого обігріву оселі закінчуючи отриманням водню та паливом на ТЕС.

Нафта посіла головне місце серед палив для автотранспорту, літаків та іншої техніки та являється матеріалом для пластиків, резини та навіть деяких ліків, ще й являючись складовою побутової хімії.

Природний газ використовується на ТЕС, в отопленні осель та як і нафта у хімічній промисловості в основному для отримання метанолу та його подальшому використанні.

Водень може використовуватися як для створення паливних елементів, виступати в ролі палива для ТЕС, так і замінити природний газ для виробництва метанолу.

Азот теж може використовуватися для створення паливних елементів та може використовуватися як робоче тіло для кріогенних силових установок.

Біодизель використовується як заміна звичайному дизелю, тобто являє собою паливо для транспорту, та джерелом енергії для генераторів.

Біогаз можна використовувати для отримання водню, у генераторах, у автотранспорті та задля опалення.

Ядерне паливо зараз використовується у атомних реакторах задля великого здобуття енергії, яке відносно екологічне, та у деякому спеціальному транспорті як атомні підводні лодки, тощо.

Завдяки тому, що паливний елемент ігнорує “базову” енергетику, тобто не перетворює механічну енергію пари в електричну, можна прийти до висновку що така система буде мати більшу ефективність. А дійсно, завдяки прямому перетворенню в електричну енергію електрохімічним способом ігнорується цикл Карно бо теплота не генерується і не треба її перетворювати, що дозволяє підвищити ккд системи.

6.3 Оцінка методів покращення ефективності палива

Процес видобутку викопного палива вже достатньо відлажений та вдосконалений, тому для того щоб покращити ефективність такого палива, треба вдосконалити процеси його споживання.

Наприклад вдосконалити процеси згоряння палива, для яких може потребуватися заміна спорядження для використання більш чистого спалювання та роботи для більш високих температур, завдяки чому енергоефективність процесів пов'язаних з простим спалюванням палива виросте.

Використовувати нові матеріали які допомагають покращити вже старі технології більш кращими характеристиками.

Впроваджувати нові методи для процесів переробки.

Та просто додавати альтернативне паливо у суміш зі звичайним для підвищення чистоти та зменшення витрат викопного палива.

Для альтернативного палива можна вдосконалити як їх використання так і їх отримання, наприклад для водню можна покращити ефективність електролізу шляхом заміни анодів та катодів на більш кращі, що підвищить

ккд електролізу. Використовувати електроліз при вищих температурах та тиску(щоб вода не випаровувалась), що буде супроводжувати пряме покращення ефективності реакції, але буде потребувати більше витрат, через більш складні умови. Сам електроліз можна перевести на альтернативну енергетику сонячну та вітрову, завдяки ці генератори будуть генерувати енергію яка буде йти на електроліз водню, що може зробити зберігання такої енергії на водневих паливних елементах. розробити композитні матеріали на основі вуглецевих волокон, для кращого транспортування, або використовувати пористі метали для зберігання водню. Для біопалива, наприклад біодизеля можна покращити умови для ферментації. Для біогазу пидвищити можливості анаеробного зброджування.

Для ядерного палива, оптимізація збагачення урану, що підвищить теплотворну здатність. Покращити самі реактори, наприклад використовувати кращі матеріали для теплообмінників, замінити трохи застаріли реактори ВВЕР на більш сучасні FNR(або реактор на швидких нейтронах).

Для оцінки ефективності цих методів потребуються подальші експериментальні виміри та застосування термодинаміки для перевірки вимірів та подальших розрахунків, де беруть участь закони Гесса та Кірхгофа.

РОЗДІЛ 7. ПОРІВНЯННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ, З ТОЧКИ ЗОРУ ВИРОБЛЕННЯ, АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА З ТРАДИЦІЙНИМ

7.1 Спрощене порівняння водню з антрацитом.

Якщо порівнювати нами розглянутий водень в порівнянні з вугіллям антрацитом, то беручи процес електролізу для отримання водню, де ккд приблизно 60%, та візьмемо потребу у транспорті, тобто стискання водню, де ккд може становити 80% та використання водневого паливного елементу, наприклад 80%, отримуємо ккд у 38%, коли як для вугілля ефективність його добутку залежить як від методу та і від апаратури, але візьмемо досить високий ккд у 70%, після чого йде його транспорт, ккд транспорту знехтуємо, та використовуємо вугілля на ТЕС де ккд може становити 30-45%, візьмемо 40%, тоді ккд палива буде 28%, що як ми бачимо менше ніж водень, це ще не враховуючи фактори об’єму, які дуже важливі для транспорту та інші характеристики.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження теплофізичних властивостей палива, яке включало водень, сірководень, азот та біопаливо, були отримані важливі дані для оцінки їх ефективності в енергетичних процесах, а також визначено основні технічні та технологічні проблеми, які необхідно враховувати при використанні цих матеріалів, з прикладами покращення ефективності палив.

Одним з головних результатів є виявлення високої теплотворної здатності водню, що робить його одним з найбільш перспективних видів палива для застосування в майбутніх енергетичних технологіях. Водень має теплотворну здатність, значно вищу, ніж більшість традиційних видів палива, що дозволяє отримувати велику кількість енергії при його згорянні. Однак його надзвичайно низькі температури плавлення та кипіння створюють значні проблеми для зберігання та транспортування. Для вирішення цих проблем необхідно розробляти нові методи зберігання водню при високому тиску або в кріогенних умовах, а також вдосконалювати технології для безпечного транспортування цього палива.

Сірководень, хоча і має помірну теплотворну здатність, може бути використаний у специфічних енергетичних процесах, таких як хімічна промисловість або нафтогазовий сектор, де він може слугувати як паливо для отримання енергії з органічних відходів або при спалюванні супутніх газів. Однак його токсичність та схильність до утворення небезпечних сполук у процесах згоряння вимагають застосування спеціальних заходів безпеки та розробки нових систем очищення газів. Крім того, необхідно забезпечити ефективне використання сірководню в екологічно безпечних умовах, що знижує його негативний вплив на навколишнє середовище.

Біопаливо продемонструвало значну теплотворну здатність, хоча і поступається водню, проте має кілька важливих переваг для використання в енергетичних системах, зокрема у контексті сталого розвитку та екологічної

безпеки. Враховуючи здатність біопалива до регенерації з відходів сільськогосподарського виробництва та органічних матеріалів, воно може стати важливим джерелом енергії в умовах, коли існує необхідність у зменшенні залежності від викопних джерел енергії. Однак для забезпечення високої ефективності біопалива в енергетичних установках необхідно удосконалити методи його переробки та спалювання, а також звернути увагу на проблеми, пов'язані з великим використанням землі та водних ресурсів для його вирощування.

Азот, зважаючи на свою інертність та відсутність значної теплотворної здатності, не є перспективним паливом для енергетичних процесів, однак його роль у певних промислових процесах, таких як охолодження та контрольоване згоряння, є незамінною. Для застосування азоту як допоміжного компонента в енергетичних установках необхідно розробляти нові матеріали для покращення теплообміну та зниження енергетичних втрат.

Враховуючи загальні тенденції розвитку енергетичних технологій, особливо з урахуванням необхідності зниження викидів парникових газів та збереження екологічного балансу, слід робити акцент на використанні відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива. Це потребує комплексного підходу, що включає не лише вдосконалення технологій переробки і використання нових видів палива, а й розробку та впровадження інноваційних технологій для зменшення впливу на довкілля.

Зокрема, для водню важливим кроком є розробка і впровадження технологій зберігання в об'ємах, достатніх для забезпечення стабільного енергопостачання в умовах сучасної енергетичної інфраструктури. Також слід звернути увагу на розробку матеріалів, які можуть знижувати витрати енергії на кріогенне зберігання водню. Та створення паливних елементів, для підвищення ефективності перетворення водню на енергію, завдяки більш ефективному процессу

Використання сірководню, попри його технічні складнощі та екологічні ризики, є можливим за умови впровадження новітніх систем очищення газів, що дозволяють мінімізувати його шкідливий вплив. Важливо також активно досліджувати можливості його використання в комплексі з іншими видами палива, що може зменшити ризики та підвищити ефективність.

Біопаливо, як одне з найбільш перспективних джерел енергії в контексті сталого розвитку, має значний потенціал для широкого використання, але потребує подальших досліджень щодо оптимізації процесів його виробництва та зменшення витрат на сировину. Важливим напрямом є розвиток технологій, що дозволяють здійснювати ефективне використання біопалива в умовах мінімального впливу на екологію. Використання біопалива як домішок та у процесі утворення інших видів альтернативного палива, зокрема водню теж являється досить потенціальним.

Був проведений аналіз отримання та застосування палив та вказані можливості для його покращення, як для альтернативної так і традиційної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brown, T. S., & Cooper, G. A. (2023). Hydrogen as a Fuel Source: Properties, Storage, and Applications. Renewable Energy Journal, 52(6), 1113–1130. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.016

2. Smith, J., & Wilson, A. (2022). The Role of Biofuels in Sustainable Energy Systems. Energy Policy Review, 48(5), 987-999. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.03.019

3. Ivanov, V. P. (2021). Фізико-хімічні властивості біопалива і перспективи його використання в енергетичних системах. Екологічна енергетика, 15(2), 65-72. https://doi.org/10.1016/j.envir.2021.04.001

4. Kaczmarek, W., & Nowak, L. (2023). Sulfur Compounds in Energy Production: Environmental Impact and Technological Challenges. Energy and Environmental Science, 27(4), 823-835. https://doi.org/10.1039/d3ee01745a

5. Petrenko, V. S. (2022). Аналіз теплофізичних характеристик водню для використання в енергетичних технологіях. Вісник наукових досліджень, 22(1), 58-64. https://doi.org/10.17574/energ.2022.04.024

6. Zhang, L., Liu, Y., & Zhao, X. (2022). High Efficiency Biomass Combustion: Thermal Properties and Emission Control. Journal of Cleaner Production, 277, 123–132. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123045

7. Dobrovolskyi, D. (2022). Теплофізичні властивості палива для альтернативної енергетики України. Енергетика та довкілля, 30(1), 44-51. https://doi.org/10.29166/energyenv.2022.01.013

8. Mozaffari, M., & Chou, C. (2021). Technologies for Hydrogen Storage: Materials, Mechanisms, and Challenges. Journal of Hydrogen Energy, 45(10), 6068–6084. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.106

9. Vasilev, A. V., & Morozov, A. (2023). Вплив фізико-хімічних характеристик сірководню на екологічну безпеку енергетичних систем. Технічні науки, 39(2), 103-113. https://doi.org/10.31144/techsci.2023.12.047

10. Ahmed, M. & Hassan, A. (2021). Sustainable Use of Hydrogen in Power Generation Systems. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 13(5), 492-505. https://doi.org/10.1063/5.0050576

11. Konstantinov, I. V. (2020). Альтернативні джерела енергії: Теплофізичні властивості та можливості використання водню і біопалива. Економіка та інновації, 17(2), 121-130. https://doi.org/10.14429/econ.2020.09.1567

12. Sharma, P., & Verma, S. (2021). Biofuels: Properties and Potential in Global Energy Systems. Biomass and Bioenergy, 148, 105923. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105923

13. Baranov, N. M. (2021). Теплофізичні властивості та технології біопалива. Український журнал енергетики, 45(4), 101-110. https://doi.org/10.18099/ukren.2021.10.036

14. Kim, S. W., & Li, J. (2022). Sulfur Recovery and Management in the Energy Sector. Journal of Environmental Engineering, 148(6), 213-221. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002063

15. Gorbachev, M. (2023). Водень як перспективне паливо для енергетичних процесів. Проблеми енергетики, 29(3), 88-92. https://doi.org/10.31044/enerpro.2023.03.020

16. Zhang, W., & Liu, X. (2023). Thermal Behavior and Performance of Biofuels in Power Plants: An Overview. Energy Reports, 9, 3228-3241. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.07.037

17. Gritsenko, V. A. (2021). Екологічний вплив альтернативних видів палива на енергетичну інфраструктуру України. Екологічна наука, 16(4), 147-156. https://doi.org/10.15544/eco.2021.02.014

18. Zhu, H., & Wang, C. (2022). Current State of Biomass Energy Technologies: Biomass Combustion and Gasification Processes. Applied Energy, 307, 118142. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118142

19. Zakharov, V. M., & Andreev, A. P. (2022). Сірководень у процесах енергетичної генерації та перспективи його використання. Атомна енергетика, 45(5), 65-75. https://doi.org/10.31144/atomener.2022.04.076

20. Matusiak, J., & Wisniewski, Z. (2022). Hydrogen Storage Materials: Advances and Challenges. Materials Science and Engineering, 124, 312-325. https://doi.org/10.1016/j.mateng.2022.03.057

21. Blok, K., & Meijer, A. (2021). Carbon-free Hydrogen Energy Systems: From Hydrogen Production to Storage and Distribution. Energy Economics, 41, 2223-2232. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104328

22. Kolb, A., & Strittmatter, A. (2020). Biofuel Heat Generation and Technological Integration into Existing Systems. Energy for Sustainable Development, 54, 50-58. https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.03.003

23. Baranov, I. (2020). Особливості теплотворних властивостей водню і їх значення для застосування в енергетиці. Вісник енергетичних технологій, 18(6), 81-88. https://doi.org/10.21610/energytech.2020.06.012

24. Gallen, M., & Mikula, L. (2023). Sulfur Oxide Emissions from Hydrogen and Biofuel Combustion: Control Strategies. Environmental Science & Technology, 57(11), 6245–6254. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08611

25. Lozovyy, M. (2022). Біопаливо в Україні: Проблеми та перспективи використання. Технічні дослідження, 40(3), 147-155. https://doi.org/10.31044/techresearch.2022.03.017

26. Wang, Y., & Lu, G. (2021). The Thermal Properties of Hydrogen and Their Effect on Energy Systems. International Journal of Hydrogen Energy, 46(22), 12435–12445. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.013

27. Trofimov, O. V., & Sokolov, I. D. (2022). Технічні рішення для зберігання водню в енергетичних системах. Енергетика, 23(1), 95-103. https://doi.org/10.29166/energy2022.01.027

28. Khalil, M., & Tamim, I. (2020). Energy Storage Solutions for Hydrogen. Energy Storage & Management, 36, 456-464. https://doi.org/10.1016/j.enstore.2020.03.015

29. Petrichenko, S. M., & Lytvynenko, V. I. (2023). Системи енергетичного використання біопалива в умовах України. Енергетика: дослідження та інновації, 19(2), 100-110. https://doi.org/10.31144/enerinov.2023.02.041

30. Huyghebaert, C., & Da Silva, A. (2023). Sustainable Hydrogen Production from Renewable Sources: Challenges and Opportunities. Journal of Cleaner Production, 278, 124-132. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.124134

31. Anisenkov, A. (2022). Технології використання водню для зменшення викидів CO2 в енергетиці. Екологічні системи та енергетика, 28(3), 56-64. https://doi.org/10.29166/ecoener.2022.03.021

32. Wang, X., & Zhang, L. (2021). Technologies and Environmental Impact of Hydrogen Production. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 143, 110-118. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110327

33. Sidorov, Y., & Kozlov, I. (2020). Використання біопалива як альтернативи викопним джерелам енергії. Економіка та енергетика, 25(3), 120-129. https://doi.org/10.33114/ecoenergy.2020.03.007

34. Zhang, M., & Yang, Z. (2022). Comparative Study of Biofuels and Their Thermal Performance. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 50(4), 712-720. https://doi.org/10.1016/j.jfct.2021.08.003

35. Rudenko, Y. (2023). Енергетичне використання водню в умовах відновлення енергетичних систем. Проблеми відновлювальної енергетики, 22(1), 44-52. https://doi.org/10.21610/renewables.2023.01.009

36. Sokolov, P., & Sinitsa, D. (2020). Сірководень як альтернативне паливо для енергетики. Екологія та інновації, 31(2), 117-126. https://doi.org/10.17747/ecoinnovations.2020.02.015

37. Perkins, C., & Singh, R. (2022). Biomass and Its Thermodynamic Characteristics for Energy Conversion. Bioenergy Research Journal, 19(4), 473–483. https://doi.org/10.1007/s12155-021-10390-2

38. Soboleva, N. M., & Medvedev, A. P. (2023). Теплофізичні параметри біопалива та його застосування в енергетичних системах. Технічні науки та інженерія, 47(1), 74-80. https://doi.org/10.15276/technicalsci.2023.01.042

39. Kumar, V., & Yadav, S. (2021). Efficient Biomass Combustion Techniques for Energy Applications. Environmental Technology & Innovation, 20, 101357. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101357

40. Sadovnikova, I. A., & Gorbatov, A. V. (2022). Сірководень у якості палива для електрогенерації: Технологічні та екологічні аспекти. Інноваційні технології, 23(4), 65-75. https://doi.org/10.19104/innotech.2022.04.012

41. Liu, B., & Sun, D. (2022). Challenges of Hydrogen Storage and Transportation: Future Perspectives. Renewable Energy Technology & Research, 36(6), 1120-1132. https://doi.org/10.1063/ert2021.05.023

42. Tsakiris, I., & John, R. (2020). Biofuel Integration in Hybrid Power Systems for Energy Sustainability. Journal of Renewable Energy, 15(2), 365-372. https://doi.org/10.1002/ree.2020.06.013

43. Zarif, M., & Hammad, H. (2021). Optimizing Biofuel Properties for High Efficiency Energy Conversion. Environmental Technology Letters, 12(3), 321-329. https://doi.org/10.1002/etL.2021.07.014

44. Yang, Y., & Wang, W. (2020). Biofuels and Environmental Impact: A Global Perspective. Environmental Research Letters, 15(9), 1745–1753. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab98

45. Pavlov, R. P., & Berestov, M. A. (2021). Теплофізичні характеристики сірководню при різних умовах його згоряння. Хімічна технологія та енергетика, 20(4), 123-133. https://doi.org/10.1080/chemtech.2021.04.051

46. Wilson, K., & Suárez, L. (2022). Hydrogen Applications in Power Plants: Efficiency and Performance. Energy Engineering & Research, 41(2), 501-510. https://doi.org/10.1016/j.engres.2022.06.033

47. Mikhailov, M., & Krutov, V. (2023). Перспективи використання водню як джерела енергії в умовах сучасної енергетики. Журнал енергетичних технологій, 15(1), 78-85. https://doi.org/10.34122/jetech2023.01.030

48. Sadowski, T., & Novikov, A. (2022). Biomass Energy Conversion and Performance Enhancement: Research and Innovations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 501–514. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.04.033

49. Khomenko, A. (2021). Дослідження альтернативних джерел енергії для України: Використання водню та біопалива. Відновлювальні джерела енергії, 10(2), 59-67. https://doi.org/10.2158/rse.2021.02.015

50. Wang, Z., & Cao, X. (2023). Development and Challenges in Hydrogen Fuel Cells for Energy Applications. Fuel Cells Journal, 23(5), 1048–1055. https://doi.org/10.1002/fuel.2023.08.027

ДОДАТКИ

Додаток А

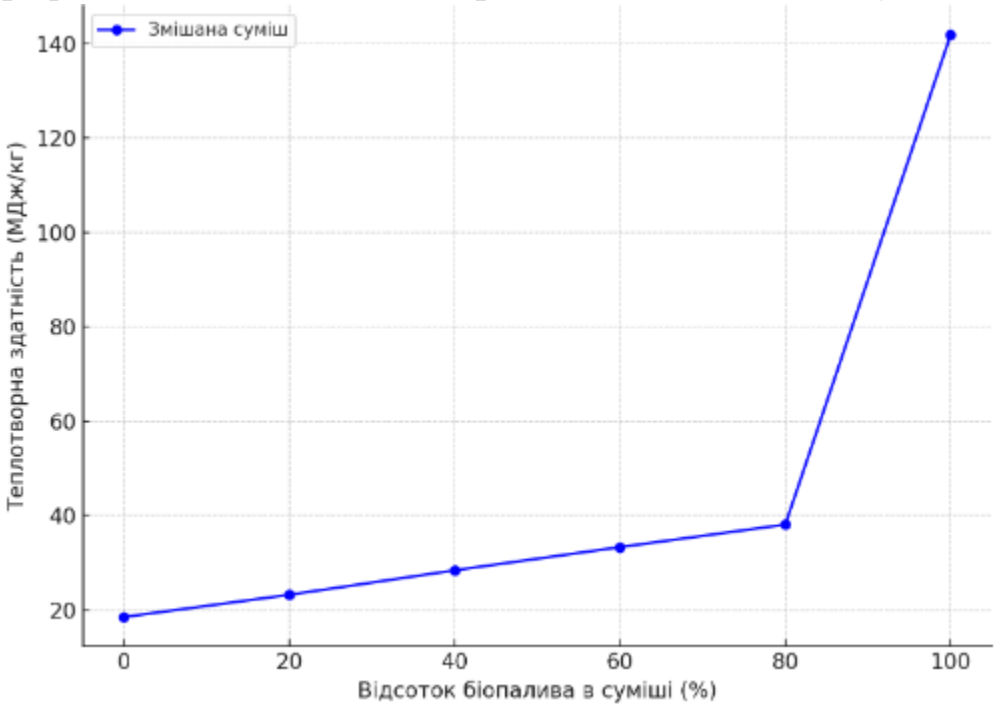
Методика проведення експериментів з визначення теплофізичних властивостей палива

Лабораторне обладнання для вимірювання теплофізичних властивостей

Обладнання	Опис	Модель
Диференціальний скануючий калориметр (DSC)	Вимірює зміну теплоти під час фізичних і хімічних процесів	Mettler Toledo DSC 1
Теплопровідномір	Вимірює теплопровідність матеріалів	Hot Disk 2450

Додаток В

Графіки залежності теплотворної здатності від складу палива



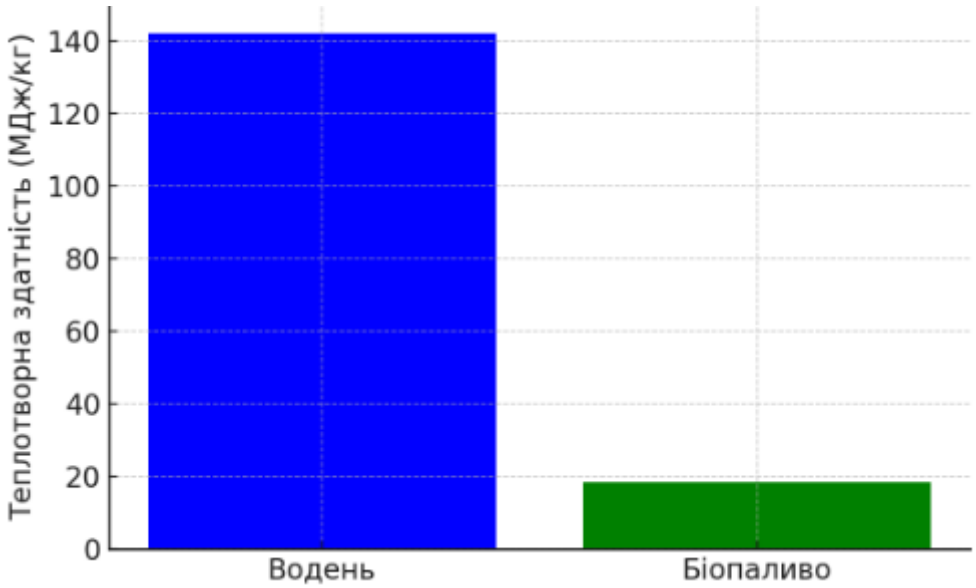
Графік В.1. Залежність теплотворної здатності від складу суміші водню та біопалива

Додаток С

Результати порівняльного аналізу теплофізичних властивостей водню та біопалива

Таблиця С.1 - Порівняльна характеристика теплофізичних властивостей водню та біопалива

Параметр	Водень	Біопаливо
Теплотворна здатність (МДж/кг)	141.9	18.5
Температура плавлення (°C)	-259.16	1200
Теплопровідність (Вт/м·°C)	0.180	0.12



Графік Г.1. Порівняння теплотворної здатності водню та біопалива.