МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

за освітньо-професійним рівнем «магістр»

# «Аналіз можливості застосування біогазу в скловарному виробництві»

Виконав: ст. 2 курсу, група НФ-61

Цапенко А. А.

Спеціальність:

105 Прикладна фізика та наноматеріали

Керівник: доцент Кошельнік О.В.

Рецензент: Круглякова О.В.

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Інститут Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр

Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

_____ О.П. Кулик

"____"_____2023 року

# З А В Д А Н Н Я

## НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Цапенко Альона Анатоліївна

1. Тема роботи Аналіз можливості застосування біогазу в скловарному виробництві_____

керівник роботи _____Кошельнік Олександр Вадимович_____

затверджені наказом по університету від "__"_____2023 року №____

2. Строк подання студентом роботи 07.12.2023_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити

Аналіз сучасного стану розвитку біопалив них технологій. Аналіз технологій отримання різних видів біопалива. Технологія та обладнання скловарного виробництва. Тепловий баланс скловарної печі. Визначення кількості біогазу для подачі в піч. Розрахунок регенеративного теплообмінника скловарної печі за умов застосування різного складу палива.

4. План роботи

| № з/п | Назви етапів роботи |
|---|---|
| 1 | Аналіз сучасного стану розвитку біопалив них технологій. Аналіз технологій отримання різних видів біопалива. |
| 2 | Вивчення технології та обладнання скловарного виробництва. |
| 3 | Тепловий баланс скловарної печі. Визначення кількості біогазу для подачі в піч. |
| 4 | Розрахунок регенеративного теплообмінника скловарної печі за умов застосування різного складу палива. |

5. Дата видачі
завдання_____

**Студент** _____ Цапенко А. А.

підпис

**Керівник роботи** _____ Кошельнік О.В

підпис

# РЕФЕРАТ

Цапенко Альона Анатоліївна. «Аналіз можливості застосування біогазу в скловарному виробництві». Кваліфікаційна робота магістра прикладної фізики. - ХНУ імені В. Н.Каразіна, 2023. - 73 с.

Ключові слова: БІОПАЛИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СКЛОВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО, БІОПАЛИВО, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС .

Мета роботи: проаналізувати потенціал застосування біогазу в скловарному виробництві з метою визначення ефективності його використання.

Основними завданнями роботи є: аналіз сучасного стану розвитку біопалив них технологій; аналіз технологій отримання різних видів біопалива; вивчення технології та обладнання скловарного виробництва; визначення теплового балансу скловарної печі; визначення кількості біогазу для подачі в піч; розрахунок регенеративного теплообмінника скловарної печі за умов застосування різного складу палива.

Дипломна робота містить: 73 сторінки, 14 рисунків, 10 таблиці, 15 джерел.

# ABSTRACT

Alona Tsapenko Anatoliivna. "Analysis of the possibility of using biogas in glass production". Master's thesis in applied physics. - KhNU named after V. N. Karazin, 2023. - 73 p.

Keywords: BIOFUEL TECHNOLOGIES, GLASS PRODUCTION, BIOFUEL, HEAT BALANCE.

The purpose of the work: to analyze the potential of using biogas in glass production in order to determine the efficiency of its use.

The main tasks of the work are: analysis of the current state of development of biofuel technologies; analysis of technologies for obtaining different types of biofuel; study of glass production technology and equipment; determination of the heat balance of the glass furnace; determination of the amount of biogas to be fed into the furnace; calculation of the regenerative heat exchanger of the glass furnace under the conditions of using different fuel compositions.

The thesis contains: 73 pages, 14 figures, 10 tables,15 sources.

# ЗМІСТ

ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ БІОПАЛИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 7
1.1 Джерела та потенціал розвитку біоенергетики 7
1.2 Розвиток біогазових технологій в Україні 14
РОЗДІЛ 2. ІСНУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА 21
2.1 Технології отримання твердого біопалива 23
2.2 Технології отримання рідкого біопалива 25
2.3 Процес отримання біогазу 33
РОЗДІЛ 3.ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ СКЛОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА 36
3.1 Загальна характеристика фізико-хімічних процесів виробництва скломаси 38
3.2 Конструкція та принцип дії скловарних печей 42
3.3 Аналіз споживання енергії при виробництві скломаси 45
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОГАЗУ В СКЛОВАРНИХ ПЕЧАХ 47
4.1 Вихідні дані для розрахунку 47
4.2 Тепловий баланс скловарної печі 47
4.3 Визначення кількості біогазу для подачі в піч 58
4.4 Розрахунок регенеративного теплообмінника скловарної печі за умов застосування біопалива 60
ВИСНОВОК 71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 72

## ВСТУП

У сучасному світі важко переоцінити роль біопаливних технологій, які розглядаються в контексті їх застосування у виробництві скла. Розробка таких технологій є не лише актуальною, але й невід'ємною частиною стратегії сталого розвитку. Існуючі методи виробництва біопалива, які широко розглядаються в літературі, стають ключовим елементом дискусії, розкриваючи їх ефективність і технічні аспекти.

Виробництво скла займає своє місце в глобальних вимогах щодо скорочення викидів і пошуку альтернативних джерел енергії, зокрема біогазу. Обґрунтування використання біогазу на скляних заводах не тільки зменшує вплив на навколишнє середовище, але й відкриває нові можливості для оптимізації енергетичних процесів. Технології та обладнання для інтеграції біогазу в скловарні печі залишаються ключовим аспектом, який потребує детального аналізу та технічного вдосконалення.

Не менш важливим є аналіз ефективності використання біогазу в контексті виробництва скла. Вимірювання та оцінка енергетичної ефективності перед вивченням впливу на якість і кінцеву продукцію вимагає збалансованого підходу та остаточного дослідження.

В результаті дослідження спрямовані не тільки на поточний стан використання біопалива у виробництві скла, а й на визначення перспектив розвитку, які забезпечують ефективність, стійкість і відповідність сучасним стандартам екологічної відповідальності.

# РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ БІОПАЛИВНИХ

# ТЕХНОЛОГІЙ

## 1.1 Джерела та потенціал розвитку біоенергетики

Рослини і тварини складаються з біологічної маси, основою якої є органічні сполуки вуглецю. Під час з'єднання цих органічних сполук з киснем, яке відбувається при горінні або природному обміні речовин, виділяється тепло. Біомаса може бути перетворена за допомогою хімічних або біохімічних процесів для отримання різних палив, таких як метан, рідкий метанол або тверде деревне вугілля. Початкова енергія біомаси виникає під час фотосинтезу, коли сонячна радіація взаємодіє з киснем. Під час спалювання енергія, отримана з біопалива, розсіюється, але продукти згоряння можуть бути перетворені назад у біопаливо за допомогою природних екологічних або сільськогосподарських процесів. Тому використання комерційного біопалива, яке взаємодіє з природними екологічними циклами, може бути екологічно безпечним і забезпечувати стійкий процес виробництва енергії.

Промислове використання енергії біомаси може бути дуже значущим, наприклад, на одиниці площі суходолу утворюється приблизно вдвічі більше, ніж на одиниці площі моря. Завдяки відходам виробництва цукру в країнах, які його постачають, може бути задоволено до 40% потреб у паливі. Використання біопалива у вигляді дерева, навозу та стебел рослин має велике значення в домашньому господарстві приблизно для 50% населення планети, забезпечуючи виробництво загалом близько 300 ГВт. Проте, якщо припустити, що біомаса відновлюється, необхідно забезпечити її виробництво принаймні на рівні споживання. Для людства загрозливо те, що в даний момент витрата деревного палива значно перевищує його відновлення.

Використання біомаси та біопалива як накопичувачів енергії має фундаментальне значення. Мета всіх процесів - забезпечити виробництво різних видів палива, придатних для найрізноманітніших застосувань, включаючи рідке паливо для транспорту. Чиста специфічна енергія, яку можна отримати при спалюванні, варіюється від 10 МДж/кг (сировина деревина) до 40 МДж/кг (жири, нефтеподібні речовини) та 55 МДж/кг для метану. Теплота згорання сухої біомаси, яка переважно містить вуглеводи, становить приблизно 20 МДж/кг. [8]

Біоенергія виходить з біомаси, органічного матеріалу, який походить від рослин і тварин. Джерела та потенціал розвитку біоенергетики різноманітні та включають різні джерела сировини, технології та застосування. Ось деякі ключові джерела та потенційні аспекти розвитку біоенергетики:

1. Джерела біомаси

У світі біоенергетики для виробництва енергії використовуються різні джерела біомаси, включаючи різні категорії природних ресурсів. У ній важливе місце займають сільськогосподарські відходи, такі як стебла і шкаралупа, які залишаються після збору врожаю. Ці рослинні залишки могли б стати важливим джерелом для отримання біоенергії, починаючи з процесу росту і забезпечуючи використання його енергетичного потенціалу. Іншим важливим елементом виробництва біоенергії є лісові відходи, такі як тирса і тріска. Ці побічні продукти лісозаготівель можна ефективно використовувати, забезпечуючи додаткове джерело відновлюваної енергії та сприяючи сталому лісовому господарству. Енергетичні культури, такі як живці верби та верба звичайна, вирощені спеціально для виробництва енергії, відкривають можливості землекористування для виробництва енергії та біопалива. Органічні

відходи, включаючи органічні матеріали, такі як тверді відходи та осад стічних вод, також привертають увагу при виробництві енергії. Використання цих органічних відходів у біоенергетичних процесах дозволяє ефективно управляти відходами та створювати додаткові джерела енергії.

## 2. Технології біоенергетики

У світі біоенергетики використовуються різні технології виробництва енергії з біомаси. Біохімічні варіанти передбачають використання мікроорганізмів для розщеплення біомаси для отримання біопалива, такого як етанол та біодизель. Методи термохімічної конверсії використовують тепло для зміни структури біомаси та виробництва біопалива або інших видів енергії, включаючи піроліз, газифікацію та спалювання. Анаеробне травлення - це процес мікробіологічного розкладання органічної речовини без доступу кисню, що призводить до утворення біогазу, особливо метану та вуглекислого газу. Пряме спалювання передбачає пряме використання спалювання біомаси для виробництва тепла та електроенергії. [10]

## 3. Біопаливо

Біопаливо - це енергетичні ресурси, одержувані з органічних матеріалів, і визначається як екологічно безпечна альтернатива традиційним видам палива. У цьому контексті існує кілька видів біопалива, кожне з яких виробляється з використанням власного технологічного процесу і джерела сировини. По-перше, етанол, різновид біопалива, перетворює органічні ресурси в паливо шляхом бродіння цукрів, що містяться в різних культурах, таких як цукрова тростина, кукурудза та целюлозні матеріали, що дозволяє отримати етанол, який можна використовувати як альтернативу звичайним видам бензину. Другим

важливим видом біопалива є біодизельне паливо, що отримується з рослинних олій, тваринних жирів або перероблених олій. Цей процес дозволяє отримати ефективне паливо, яке можна використовувати для дизельних двигунів.

Біогаз, що містить метан, отримують шляхом анаеробного бродіння органічних відходів. У цьому процесі відходи використовуються для отримання газу, який може діяти як джерело енергії. Таким чином, біопаливо є сучасним, стійким і прогресивним енергетичним рішенням, яке допомагає знизити залежність від традиційних вуглеводнів і скоротити викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище.

4. Переваги та потенціал:

Однією з значних переваг біоенергетики є її вуглецева стійкість. Спалювання біомаси виділяє вуглець в атмосферу, але процес можна вважати безвуглецевим, якщо кількість вивільненого вуглецю компенсується поглинанням вуглецю під час зростання біомаси. Такий цикл визначається як вуглецевий баланс, що робить біоенергетику менш обтяжливою для клімату порівняно з традиційними видами енергії.[10]

Паливо з біомаси характеризується вмістом вологи та вуглецю. Волога присутня в матеріалі біомаси у вигляді внутрішньоклітинної та міжклітинної води, що робить сушку біомаси обов'язковою. Під час збору врожаю біомаса рослин часто містить 50% вологи, а водорості можуть досягати 90% вологи (особливо для водоростей, які ростуть у воді, а не на землі). Матеріал вважається «сухим», якщо він довгостроково перебуває в рівновазі з навколишнім середовищем і містить від 10% до 15% вологи.

Вуглецеві палива можна класифікувати за рівнем відновлення енергії. У процесі перетворення біомаси на $CO_2$ і $H_2O$ корисна енергія, що

вивільняється, становить приблизно 450 кДж на моль вуглецю (або 38 МДж на 12 кг вуглецю) при одиничному рівні відновлення R=1. Це приблизне значення, оскільки існують інші перетворення енергії. Наприклад, цукор (R=1) має теплоту згоряння приблизно 450 кДж на 12 г вуглецю. Повністю перетворений матеріал, такий як метан CH4 (R = 2), має теплоту згоряння приблизно 900 кДж на 12 г вуглецю (або 16 г самого метану). [8]

Наявність вологи в паливі з біомаси часто призводить до значних втрат теплової енергії через випаровування води, що вимагає 2,3 МДж/кг. Щільність біомаси також важлива, оскільки сухі біологічні матеріали зазвичай у 3-4 рази менші за щільність вугілля. Транспортування та обробка таких матеріалів може бути складною та дорогою, особливо якщо утилізація відбувається далеко від джерела виробництва біомаси.

Розвиток енергетики за рахунок використання сільськогосподарських культур має свої переваги та недоліки, які можна класифікувати наступним чином:

1. Переваги:

✓ Великі потенційні запаси: Біомасса має великі резерви, доступні для використання.

✓ Різноманітність культур: Існує велика різноманітність рослин, які можна використовувати для виробництва біомаси.

✓ Різноманітність використання: Біомасса має різноманітність застосування, включаючи транспорт та виробництво електроенергії.

✓ Зв'язок із існуючим сільським господарством та лісівництвом Використання біомаси може бути інтегровано з існуючою сільськогосподарською та лісовою діяльністю.

- ✓ Заохочення інтегрованого сільськогосподарського виробництва: Заохочення систем, що поєднують сільське господарство та виробництво енергії.

- ✓ Ефективне використання побічних продуктів, відходів та стічних вод Можливість ефективного використання побічних продуктів та відходів виробництва.

- ✓ Поліпшення стану навколишнього середовища: Утилізація відходів може призвести до покращення екологічної ситуації.

- ✓ Використання комплексної ефективної обробки: Зменшення забруднення води та повітря через комплексну та ефективну переробку.

- ✓ Розвиток сільського господарства Використання біомаси може сприяти розвитку сільського господарства.

- ✓ Розширення можливостей економії: потенціал економії за рахунок використання біомаси у виробництві продуктів, на землі та у сфері зайнятості.

- ✓ Великий потенціал у тропічних країнах: Особливо важливий потенціал у тропічних країнах, що розвиваються.

- ✓ Створення агропромисловості: Розвиток галузі, що сприяє вирішенню різних завдань, включаючи культурний та освітній розвиток.[8]

- ✓ Небезпеки та проблеми:

- ✓ Може спричинити виснаження та ерозію ґрунтів: Використання біомаси може призвести до виснаження та ерозії ґрунтів.

- ✓ Можлива конкуренція з продукцією харчової промисловості Існує можливість конфлікту із виробництвом харчових продуктів.

- ✓ Використання генної інженерії може призвести до появи неконтрольованих організмів: використання генної інженерії може призвести до виникнення організмів, які не можуть бути контрольованими.

- ✓ Велика агропромисловість може бути надто складною для ефективного управління: Масштабна агропромисловість може виявитися надто складною для ефективного керування.

- ✓ Транспортування біомаси на переробні заводи може призвести до перевантаження транспорту: Транспортування біомаси на переробні заводи може призвести до перевантаження транспортної інфраструктури.

- ✓ Помилки у проектуванні та відсутність замкнутого циклу переробки можуть призвести до забруднення навколишнього середовища.[8]

Використання тепла, виробленого спалюванням біомаси, має різноманітні застосування, включаючи приготування їжі, опалення будинків і обробку сільськогосподарських культур. Це також використовується для виробництва необхідної електроенергії для різних машин.

У більшості країн, що розвиваються, спалювання біомаси є основним джерелом палива. Це пояснюється широким використанням

деревини для опалення та приготування їжі, а також інтенсивним використанням біомаси в промислових процесах, таких як переробка цукрової тростини, сушка чаю, виробництво копри, переробка пальмової олії та виробництво паперу.

У промислово розвинутих країнах ситуація інша, оскільки тут переважає використання викопного палива, а в деяких випадках і атомної енергії. Використання різних джерел енергії в цих країнах зазвичай орієнтоване на використання більш технологічно просунутих і чистих методів отримання енергії.

## 1.2 Розвиток біогазових технологій в Україні

На початку 21 століття Україна визначила розвиток біогазових технологій як важливий напрям для забезпечення енергетичної незалежності, розвитку відновлюваної енергетики та зменшення впливу на довкілля.

Країни Європейського союзу встановили однією з цілей досягнення кліматичної нейтральності в рамках Угоди про зелений новий курс – це заміна споживання природного газу на використання відновлюваних газів (біометан, зелений водень) до 2050 року. З цією метою створюється правова база, а також готуються значні інвестиційні проекти для впровадження. Україна має всі можливості приєднатися до цього процесу.[2]

Виробництво біогазу в Україні стимулюється пільговим тарифом (зеленим тарифом) на електроенергію, вироблену з біогазу. Майже всі українські біогазові установки виробляють електроенергію з послідовним відведенням до національної електромережі. До тепер, немає спеціального законодавства для полегшення виробництва та використання біометану.

У 2019 році в Україні функціонувало принаймні 26 сільськогосподарських біогазових установ. Проекти різнились за встановленою потужністю від 125 кіловатт електричної енергії (кВт) до 12 МВт. Деякі з невеликих проектів генерували електроенергію без зеленого тарифу, два проекти виробляли лише тепло для власних промислових потреб. У той же час існувало 22 системи відновлення біогазу з виробництвом електроенергії.

Незважаючи на обмежену кількість впроваджених сільськогосподарських біогазових установ, їх технічний охоплює широкий спектр галузей та різних типів сировини. Українські біогазові установи споруджені на фермах свиней, худоби та птиці, на цукрових заводах, пивоварнях та підприємствах харчової промисловості, використовуючи різноманітні сировини, такі як навоз від свиней і худоби, відходи птиці, силос з кукурудзи та цукрового сорго, буряків та сиропу, відходи обробки продуктів харчування та промислова стічна вода.[2]

В Україні спостерігається стала тенденція збільшення обсягів виробництва енергії з альтернативних видів палива, зокрема, з біомаси. За даними енергетичного балансу України за 2018 рік, загальне постачання первинної енергії з біопалива та відходів становило 3195 тис. т н.е. (Рис. 1.1), що еквівалентно заміщенню 4 млрд м3 /рік природного газу. Частка біопалива у загальному постачанні первинної енергії складає 3,4% (понад 70% від загального постачання енергії з відновлюваних джерел). Зростання сектору за 2010-2018 рр. становить в середньому 31% на рік. [4]

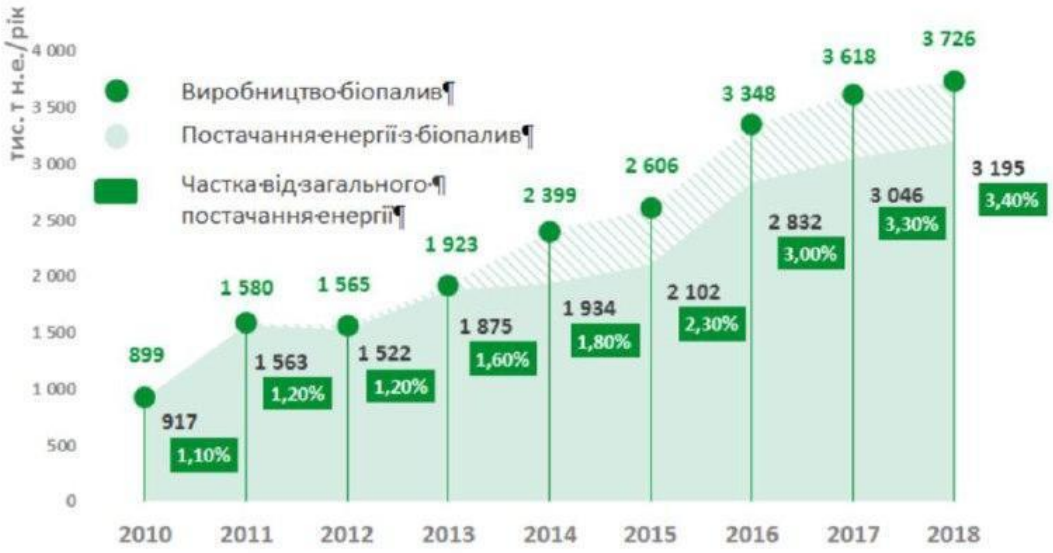



Рис. 1.1. Виробництво і споживання біопалив в Україні в 2010-2018 рр. згідно з даними Енергетичних балансів Державної служби статистики України [4]

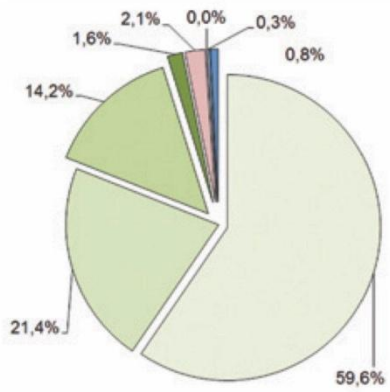
Згідно з діючою Енергетичною стратегією України на період до 2035 року , внесок біомаси, біопалива та відходів у загальне постачання первинної енергії у 2035 році має становити 11 млн т н.е., що складає 50% внеску всіх відновлюваних джерел (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1. Структура загального постачання первинної енергії України, млн т н.е.[2] [4]

| Найменування джерел | 2015 (факт) | 2020 (прогноз) | 2025 (прогноз) | 2030 (прогноз) | 2035 (прогноз) |
|---|---|---|---|---|---|
| Вугілля | 27,3 | 18 | 14 | 13 | 12 |
| Природний газ | 26,1 | 24,3 | 27 | 28 | 29 |
| Нафтопродукти | 10,5 | 9,5 | 8 | 7,5 | 7 |
| Атомна енергія | 23 | 24 | 28 | 27 | 24 |
| **Біомаса, біопаливо та відходи** | **2,1** | **4** | **6** | **8** | **11** |
| Сонячна та вітрова енергія | 0,1 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| ГЕС | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Термальна енергія | 0,5 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 |
| **ВСЬОГО, млн т н.е.** | **90,1** | **82,3** | **87** | **91** | **96** |

Розвиток біогазових технологій в Україні є важливим напрямом для створення стійкого та екологічно чистого енергетичного сектору, а також для розвитку сільськогосподарських та промислових галузей. Це також сприяє диверсифікації джерел енергії та зменшенню залежності від традиційних видів палива.

В Україні для виробництва енергії використовується близько 2,2 мільйонів тонн біомаси, що складає 1,24% від загального споживання первинних енергоресурсів. Основні джерела біомаси включають лушпиння соняшника, відходи деревини та дрова для населення. Згідно з аналітичною запискою №6 Біоенергетичної асоціації України, структура сектору біоенергетики розвивається повільно, а частка біогазу в ній залишається в невеликих межах (1%). Використання потенціалу біогазу обмежується на рівні 2% в сільському господарстві та 7% на полігонах та звалищах твердих побутових відходів. Це свідчить про потребу у подальшому розвитку біоенергетики та підвищенні ефективності використання біогазу та інших відновлюваних ресурсів в енергетичній сфері України. [3]




| | |
|---|---|
| Деревина біомаса | 59,6 % |
| Дрова | 21,4 % |
| Лушпиння соняшника | 14,2 % |
| Солома зернових і рапсу | 1,6 % |
| Біоетанол | 2,1 % |
| Біодизель | 0,0 % |
| Біогаз з відходів с/г | 0,3 % |
| Біогаз з полігонів ТБО | 0,8 % |

Рис.1.2.Використання біомаси для виробництва енергії в Україні

Табл. 1.2. Використання біомаси для виробництва енергії в Україні (2011/2012 рр.) (Аналітична записка БАУ № 6)[3]

| Вид біомаси | Річний обсяг використання | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Натуральні одиниці | тис т у.т | Частина спільного річного використання БМ | Частина від економічного цілосного потенціалу |
| Солома зернових і рапсу | 77 тис.т | 37 | 1,6 % | 1 % |
| Дрова | 2 млн м3 | 478 | 21,4 % | 80 % |
| Деревина маса | 3 міл т | 1330 | 59,5 % | 59 % |
| Лушпиння соняшнику | 665 тис .т | 318 | 14,2 % | 4 % |
| Біоетанол | 180 тис. т | 48 | 2,1 % | 4 % |
| Біодизель | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 |
| Біогаз з відходів с/г | 10 млн м3 | 7 | 0,3 % | 2 % |
| Біогаз з полігонів ТБО | 26 млн м 3 | 18 | 0,8 % | 7 % |
| Всього | | 2236 | 100 % | |

У сфері агропромислового комплексу (АПК) в Україні вже існують окремі приклади успішного впровадження біогазових установок. Перша промислова біогазова установка на відходах тваринництва була побудована в 1993 році на свинячій фермі комбінату "Запоріжсталь" і працює дотепер. Протягом тривалого часу цей проект залишався єдиним у своєму роді. Через

десять років після його запуску була збудована біогазова установка компанії "Агро-Овен", а через ще п'ять років інші підприємства, такі як "Еліта" та "Українська молочна компанія" (УМК), також звернулися до біогазових технологій.

Ці приклади свідчать про те, що у секторі АПК в Україні спостерігається поступове впровадження біогазових технологій, що може сприяти сталому використанню відходівта зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.[3]



Рис.1.3. БДУ компанії «Еліта», Терезине, Київська область

В Україні реалізовано кілька проектів використання біогазових установок (БДУ) у промисловості, зокрема на комбінаті "Запоріжжя сталь", у корпорації "Агро Овен", та у птахофабриці "Орель-Лідер", що належить корпорації "Миронівський хлібопродукт" (МХП). Деякі із цих проектів ставлять перед собою завдання очищення стоків, зменшення споживання енергії та навіть досягнення енергетичної незалежності підприємств. Ці ініціативи включають в себе виробництво теплової та електричної енергії з біогазу, що є внутрішнім джерелом для різноманітних потреб. При цьому деякі БДУ підключені до електромережі, в той час як інші працюють в ізоляції від загальної електричної мережі. Такі інноваційні проекти свідчать про зростаючий інтерес до використання біогазу як ефективного та стали

зростаючого джерела енергії в Україні.



Рис.1.4.БДУ на фермі ВРХ Української Молочної Компанії с. В. Круполь, Київська область[3]



Рис.1.5. Проект БДУ на птахофабриці «Орель-Лідер», Дніпропетровська область[3]

## РОЗДІЛ 2. ІСНУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА

Існує кілька технологій отримання біопалива, які використовують різні джерела сировини та методи переробки. Ось кілька основних технологій отримання біопалива:

1. **Біодизель:**
   - Джерела сировини: Рослини з високим вмістом олії, такі як соя, рапс, соняшник, пальма.
   - Методи переробки: Транс естерифікація або трансметиленування олії для отримання біодизельного палива.
   - Використання: Для дизельних двигунів.
2. **Біоетанол:**
   - Джерела сировини: Цукрові рослини (цукрова тростина, цукровий буряк), крохмалепродукти (кукурудза, пшениця), целюлоза (древесина, багаторічні трави).
   - Методи переробки: Гідроліз та бродіння цукрів для отримання етанолу.
   - Використання: Додавання до бензину або використання в етанолових двигунах.
3. **Біогаз (метан):**
   - Джерела сировини: Органічні відходи, гноївка, біомаса.
   - Методи переробки: Анаеробне бродіння в біогазових установках.
   - Використання: Генерація електроенергії та тепла, як паливо для транспорту.
4. **Гідроген з біомаси:**
   - Джерела сировини: Біомаса, така як деревина або солома.
   - Методи переробки: Термохімічні процеси, такі як газифікація або піроліз.
   - Використання: Водень може використовуватися в топливних

елементах або для виробництва синтетичних палив.

5. **Гідрофільні біопалива:**
   - Джерела сировини: Водорості та мікроорганізми.
   - Методи переробки: Видобуток та переробка ліпідів для отримання палива.
   - Використання: Виробництво біо-олій та біодизелю.

Ці технології є лише деякими прикладами існуючих методів отримання біопалива, і вони продовжують розвиватися для забезпечення сталого та ефективного використання ресурсів.

Як потенційні сировинні джерела для виробництва біопалив враховуються різноманітні біологічні джерела, включаючи рослини, тварин, екскременти тварин та господарсько-фекальні стічні води.

На сьогоднішній день інтереси вчених зосереджені на використанні вуглекислого газу та води для отримання рідких біопалив у фотосинтезі, а також на використанні води для отримання водню як біопалива шляхом біофотолізу або фотокаталітичного розкладання.

Пропонується класифікувати всі відомі сировинні джерела на шість груп:

1. сировина рослинного походження,
2. сировина тваринного походження,
3. сировина мікробного походження,
4. відходи життєдіяльності людей,
5. вуглекислий газ + вода + енергія випромінювання сонця+енергія випромінювання сонця.

Відповідно до цієї класифікації рис 2, тверді біопалива можуть бути

вироблені з будь-якої біологічної сировини, і асортимент твердих біопалив включає приблизно десять видів.[1]

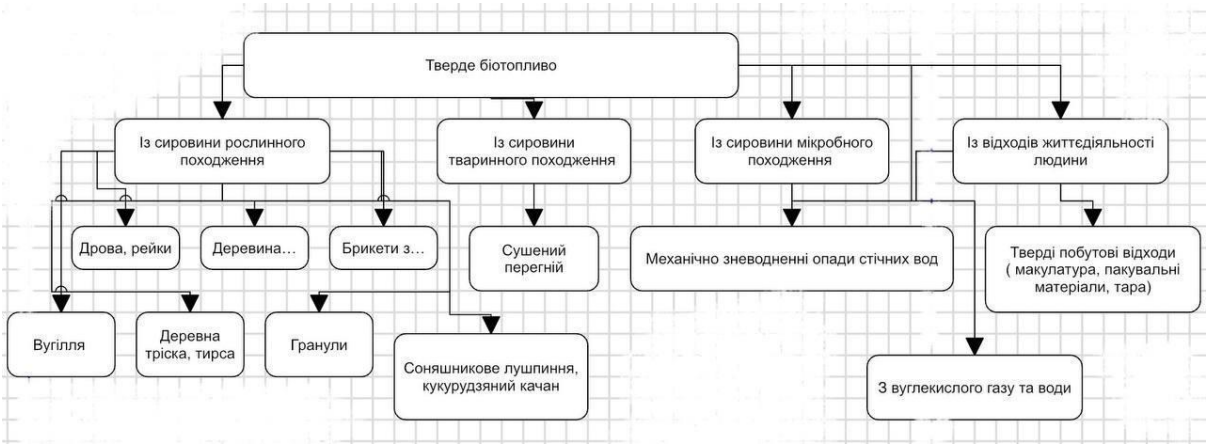



Рис.2. Класифікація твердих біопалив

## 2.1 Технології отримання твердого біопалива

Отримання твердого біопалива включає різноманітні технології, які дозволяють конвертувати біомасу в ефективне паливо. Основні технологічні методи виробництва твердого біопалива включають:

1. **Термічна обробка:**
   - Піроліз (Виробництво Біопального Масла): Процес розкладання біомаси відбувається при високих температурах в отсутстві повітря, що дозволяє отримати біопальне масло та гази.
   - Газифікація: Завдяки хімічним реакціям при високих температурах, біомаса перетворюється на синтезований газ (газове паливо), який може бути використаний для виробництва електроенергії або як паливо.
2. **Біологічне виробництво:**
   - Ферментація: Застосування мікроорганізмів або ферментів для

розкладання біомаси, зазвичай цукрів або крохмалю, для виробництва етанолу.

- Метанізація: Біологічний процес, під час якого бактерії розкладають органічні речовини в метан, який може бути використаний як природний газ.

3. **Механічна обробка:**
   - Брікетування: Спресовування біомаси у вигляді брекетів або гранул для полегшення транспортування та зберігання.
   - Роздрібнювання: Механічне подрібнення біомаси для отримання біопаливних чіпсів або частин, що полегшує їх подальше використання.[7]

Ці технології можуть застосовуватися в різних комбінаціях в залежності від типу біомаси, цілей виробництва та умов виробництва.

Деревні гранули, відомі також як пелети, є циліндричними виробами, які формуються методом екструзії із попередньо подрібненої та висушеної рослинної сировини. Вони мають діаметр класу 6-8 мм і насипну щільність 600 кг/м3 у випадку пелет I класу. Ці гранули мають низьку вміст кори та інших домішок. Теплота згоряння деревних гранул становить приблизно 17 МДж/кг. Промислові гранули мають більший діаметр від 8 до 12 мм.[1]

Сировину для виробництва деревних гранул можна отримувати з різноманітних джерел, таких як деревина, соняшникова лушпина, лушпина насіння, солома злакових культур, очерет, підстилковий гній тварин та птиці, тверді побутові відходи, а також осади стічних вод.

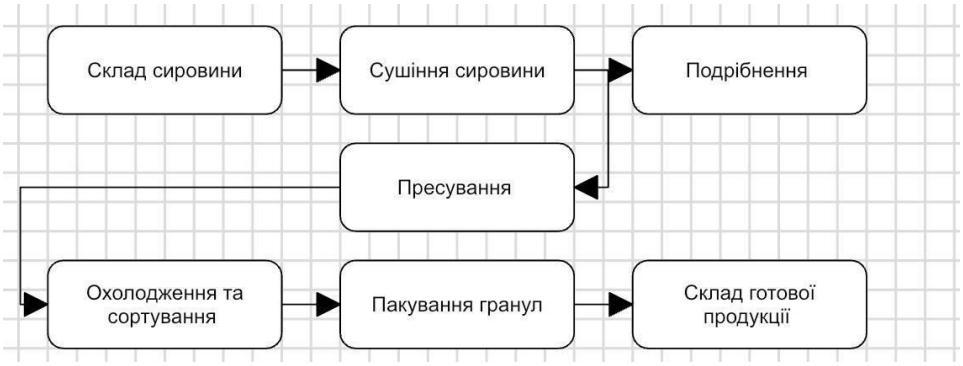



Рис.2.1. Блок-схема виробництва пелет

Останні працюють на топкових газах, отриманих від часткового спалювання вихідної сировини, або на теплоносії, який циркулює в нагрівальному регістрі. Температура сушильного агента в сушарці зазвичай коливається від 250 до 280 градусів Цельсія на вході та від 75 до 100 градусів Цельсія на виході. Вологість висушеної сировини становить від 8% до 15%.

Подрібнення сировини проводиться на дробарках барабанного або молоткового типу. Якщо сировина пересушена (з вологістю менше 8%), частинки можуть погано склеюватися при гранулюванні. У цьому випадку сировину необхідно зволожити перед пресуванням, використовуючи воду або пару, з подальшим витримуванням для вирівнювання вологості.

Процес пресування супроводжується саморозігрівом сировини до температур від 70 до 90 градусів Цельсія, тому пелети піддаються охолодженню та сортуванню, а дрібну фракцію повертають у бункер перед пресом-гранулятором. Завершальні етапи виробництва включають упаковку гранул.[1]

## 2.2 Технології отримання рідкого біопалива

Класифікація рідких біопалив представлена рисунку 2.2. Список рідких біопалив містить понад 10 найменувань. Найбільш широко рідким біопаливом, що виробляється і застосовується, є біоетанол,використовується в основному як компонент моторного палива. Теплота згоряння у біоетанолу значно нижче, ніж у бензину – 19,6 проти 32 МДж/л. На другому місці за обсягом виробництва після біоетанолу – біодизель (теплота згоряння – 31 МДж/кг).[1]

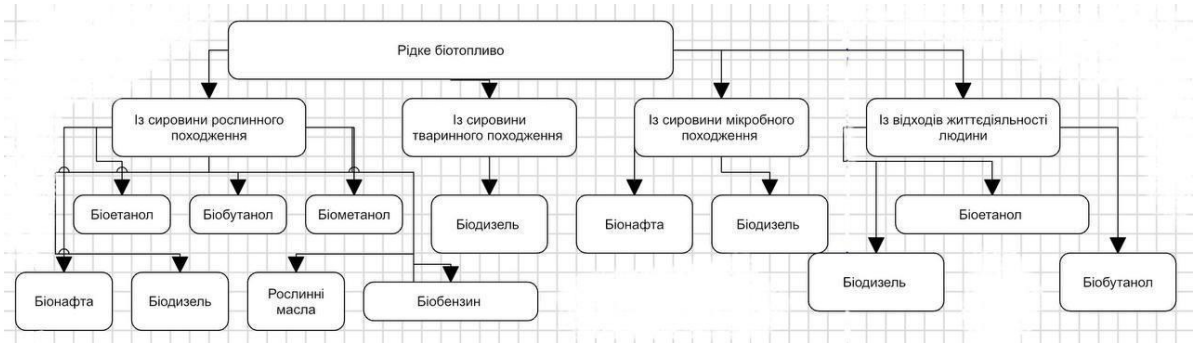



Рис2.2. Класифікація рідких біопалив

### 1.Біоетанол

Біоетанол, виготовлений із цукрових чи крохмальних рослин, ставши ключовим видом рідкого біопалива, не лише зменшує негативний вплив на клімат, а й допомагає скоротити залежність від нафтових ресурсів. Цей процес розділений на кілька етапів: спочатку вирощують сировину, після чого видобувають цукор чи крохмаль. Далі проводиться бродіння, під час якого дріжджі перетворюють сировинний цукор на етанол, а потім застосовується дистиляція та дегідратація для очищення та концентрації отриманого алкоголю. Важливим етапом є додавання біоетанолу до звичайного бензину, щоб поліпшити характеристики палива.

Переваги використання біоетанолу очевидні: зменшення викидів газів, зменшення залежності від нафти, розвиток сільського господарства та підвищення енергетичної безпеки. Проте, існують виклики, такі як конкуренція за землю для вирощування сировини, збалансованість між вирощуванням продуктів харчування та сировини для біоетанолу, великі енергетичні витрати та економічна конкурентоспроможність.[12]

Блок-схема виробництва етанолу із зерна або картоплі представлена на рис.2.3. Підготовка сировини полягає, як правило, у подрібненні сировини та її водно-теплової обробки; оцукрювання – під дією спеціальних ферментних препаратів; зброджування цукрозміщувальних середовищ – під дією дріжджів (у ряді сучасних технологій стадії оцукрювання та зброджування суміщені); відгін етанолу здійснюють на двоколонних брагоректифікаційних установках; остаточне зневоднення – на цеолітах.[1]

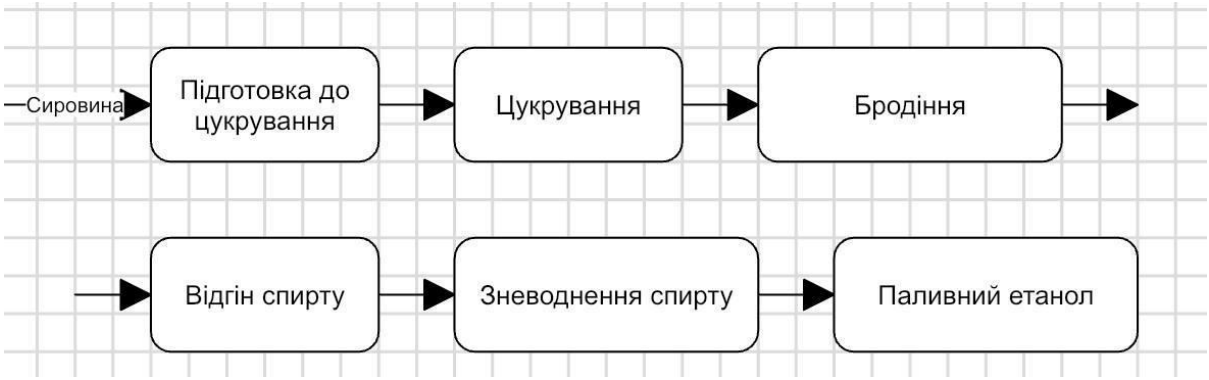



Рис. 2.3. Блок-схема виробництва паливного етанолу із зерна та картоплі

На рис.2.4 представлена блок-схема виробництва етанолу з цукрозміщувальної сировини. Сутність першої стадії – це екстракція цукру із сировини за допомогою води (у разі переробки меляси – це розсипання меляси та очищення одержаного розчину від домішок).[1]

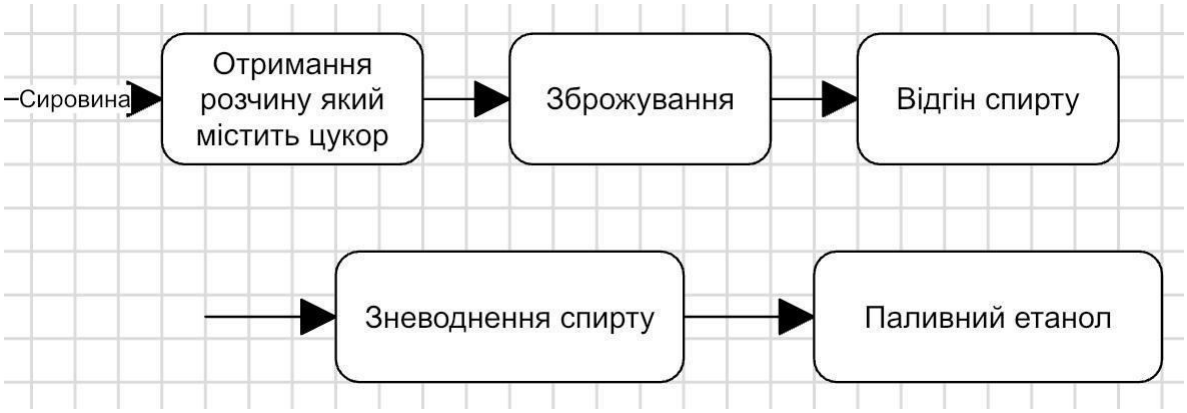



Рис.2.4. Блок-схема виробництва паливного етанолу із цукрового тростини, цукрових буряків, сорго, меляси

2.Біометанол

Біометанол – це вид біопалива, яке видобувається з біомаси, такої як деревина, солома чи інші органічні матеріали, через процес газифікації та хімічних перетворень. Цей альтернативний вид метанолу, що широко використовується у промисловості та енергетиці, має кілька ключових етапів виробництва.

Спочатку відбувається газифікація сировини, де біомаса перетворюється на синтезгаз. Далі проводиться каталітична конверсія синтезгазу в метанол. За допомогою реакторів та каталізаторів відбувається взаємодія компонентів синтезгазу, утворюючи метанол. Після чого проводиться очищення та зберігання отриманого біометанолу.

Застосування біометанолу включає в себе використання як палива для транспортних засобів, а також як хімічної сировини для виробництва різноманітних хімічних сполук. Біометанол є екологічно чистим джерелом енергії, оскільки в процесі його виробництва та згорання в атмосферу викидається менше вуглекислого газу порівняно з традиційними видами палива.[12]

# 3.Рослинні олії

Процес отримання олії з насіння включає кілька етапів, починаючи з підготовки насіння. Сировину очищають від домішок, підсушують, а потім руйнують оболонку або шкірку та відокремлюють від ядер. Далі проводять роздавлення ядер, а отриману масу просмажують при визначеній температурі, забезпечуючи перемішування та зволоження.

Оброблене насіння направляють на форпрес, де відокремлюють основну частину олії. Після цього насіння знову просмажують і проводять остаточне віджимання.

У випадку екстракційного методу вилучення олії, сировину спочатку очищають від домішок і змішують із розчинником - екстрагентом. Після перемішування розчинок відокремлюють від проекстрагованої маси насіння і направляють до поділу на розчинник та сирої олії, повертаючи розчинник на стадію екстракції.

Залишкова маса насіння, що містить екстракт, після сепарації піддається пропарюванню водяною парою. Пари розчинника та олії конденсуються разом із водяною парою, після чого відокремлюють воду та направляють її на стадію екстракції. Блок-схема виробництва представлена рис.2.5. В якості розчинників – екстрагентів використовують бензин, гексан чи етанол.[1]

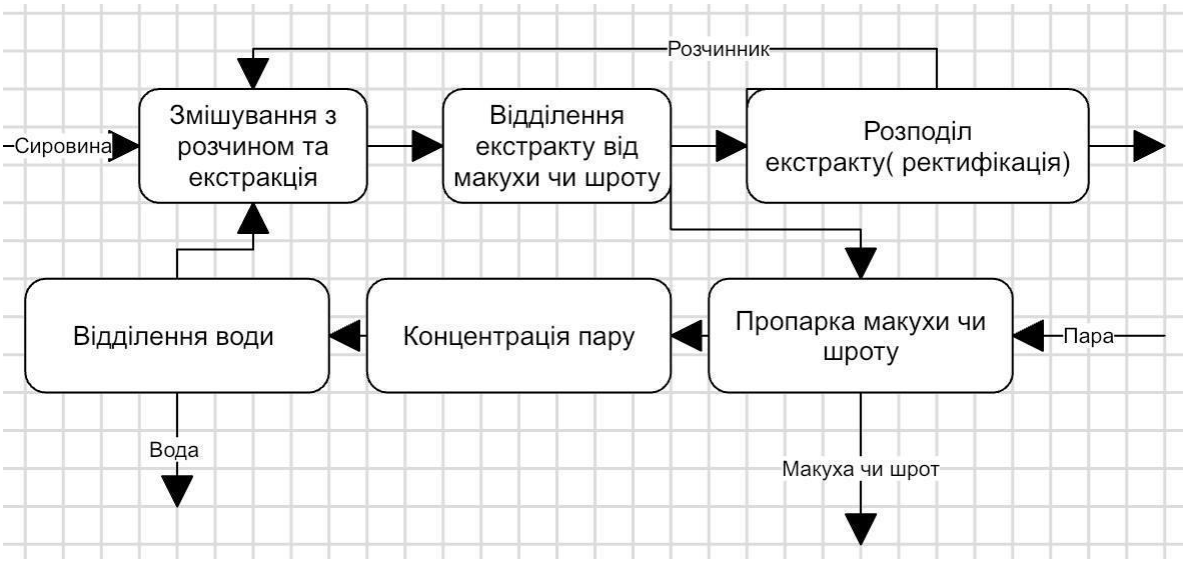



Рис.2.5 Блок-схема вилучення олії з насіння шляхом екстракції

## 4. Біодизель

Біодизель – це вид біопалива, який виготовляють із відновлюваних природних ресурсів, зазвичай з рослинних олій або жирів. Процес виробництва біодизелю включає наступні стадії:

1. **Вибір сировини:** Основною сировиною для виробництва біодизелю є рослинні олії, такі як соєва, рапсова, пальмова тощо. Також можуть використовуватися тваринні жири та відходи.
2. **Трансестерифікація:** Це хімічний процес, в результаті якого рослинні олії або тваринні жири реагують з метанолом чи етанолом за участю каталізатора (зазвичай є каустична сода або калій) для утворення біодизельного пального та гліцерину.
3. **Відділення біодизелю:** Після трансестерифікації біодизель відділяють від реакційної маси. Часто використовують центрифугу або інші методи відділення.
4. **Очищення та стабілізація:** Отриманий біодизель очищають від залишкових каталізаторів та інших забруднень, а також додають антиоксиданти для підвищення стабільності пального.

5. **Упакування та зберігання:** Готовий біодизель розливають відповідно до потреб, зазвичай великі об'єми зберігаються в спеціальних резервуарах.

Біодизель може використовуватися у дизельних двигунах без значних модифікацій, що робить його екологічною альтернативою для заміни традиційного нафтового дизпалива.[6]

Циклічна розробка.

Блок-схема процесу представлена на рис.2.6. Вихідна сировина – олія –

подають до блоку етерифікації, куди одночасно надходить метанол і розчин.

каталізатора процесу етерифікації (гідроксиди натрію або калію, або –

метилат натрію). Співвідношення між метанолом та олією від 1:4 до 1:20,

температура процесу 650, тривалість – від 20 хвилин до кількох годин.[1]

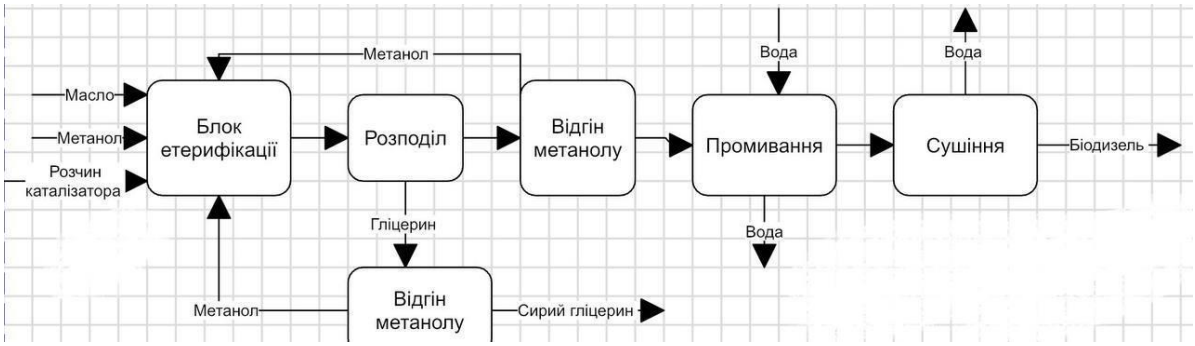



Рис.2.6. Блок-схема циклічного виробництва біодизеля

Після завершення процесу реакційну суміш поділяють (шляхом природного відстоювання) на два шари: верхній шар – суміш метилових

ефірів та метанолу, а нижній шар – гліцерин (з деякою кількістю метанолу).

Зазначимо, що поділ може здійснюватися як в окремому блоці, так і самому блоці етерифікації після завершення процесу.

Далі верхній шар направляють у блок відгону метанолу, який повертають у блок етерифікації, а сирий продукт – біодизель – направляють у блок промивки і – потім – блок сушки.[1]

5. Біонафта

Процес отримання біонафти розпочинається з вирощування рослин або культивування мікроорганізмів, які мають високий вміст ліпідів або олій. Зернові культури, такі як рапс або соя, або навіть водорості виступають у ролі сировини. Наслідує етап видобутку ліпідів, де з рослин чи мікроорганізмів вилучають ліпіди за допомогою хімічних процесів.

Отримані ліпіди піддають трансестерифікації або іншим методам перетворення, перетворюючись у біонафту, що може слугувати біодизелем або іншим видом біопалива. Цей етап включає хімічні процеси, що модифікують структуру ліпідів, щоб забезпечити властивості, необхідні для ефективного використання.

Після отримання біонафти проводять процеси очищення та модифікації для вилучення непотрібних домішок та покращення якості. Залежно від використання, біонафта може використовуватися в чистому вигляді або змішуватися з традиційною нафтою.

Отримана біонафта знаходить широке застосування в транспортній системі, енергетиці та хімічній промисловості. Крім того, використання біонафти може сприяти зменшенню викидів парникових газів, оскільки рослини чи водорості, використовувані для її виробництва, поглиблюють вуглекислий газ з атмосфери під час росту.[12]

6.Біобензин

Біобензин — це вид біопалива, який виробляється з біологічних джерел, таких як цукрова тростина, кукурудза, соя, солома та інші біомаси. Процес виробництва біобензину зазвичай включає в себе конвертацію цих рослинних матеріалів у спирт, такий як етанол, а потім його використання у суміші з традиційним нафтовим бензином.

Основні етапи виробництва біобензину можуть включати вирощування сировини, збір і транспортування біомаси, виробництво етанолу через ферментацію або інші процеси, і найпізніше — змішування етанолу з традиційним бензином у певних пропорціях.

Біобензин має певні переваги, такі як менший викид парникових газів порівняно з традиційним бензином, а також можливість використання в існуючій інфраструктурі для транспортування та розподілу. Однак його виробництво і використання також пов'язані з рядом питань, таких як конкуренція з продукцією їжі, використання землі та водних ресурсів.

## 2.3 Процес отримання біогазу

Отримання біогазу — це процес виробництва газоподібного палива з органічних матеріалів шляхом їхнього розкладання в анаеробних умовах, тобто в отсутстві кисню. Основними етапами цього процесу є анаеробний розклад біомаси мікроорганізмами, що призводить до вироблення метану та вуглекислого газу. Найпоширенішими джерелами біомаси для виробництва біогазу є органічні відходи, стічні води, рослинні залишки та інші

відновлювані джерела.[7]

Основні етапи процесу отримання біогазу:

1. **Підготовка сировини:** Органічна сировина, така як органічні відходи, стічні води чи рослинні залишки, піддається попередній обробці, яка може включати подрібнення, сепарацію та інші процеси.

2. **Ферментація:** Сировина розкладається мікроорганізмами в анаеробних умовах в процесі, що називається ферментацією. На цьому етапі виробляються різні гази, включаючи метан (головний компонент біогазу) та вуглекислий газ.

3. **Збір біогазу:** Вироблений біогаз збирається та зберігається для подальшого використання. Це може відбуватися в спеціальних ємностях чи біогазових установках.

4. **Використання біогазу:** Біогаз може бути використаний для виробництва електроенергії та тепла в когенераційних установках, а також як пальне для автотранспорту.

Отримання біогазу є важливим напрямком в розвитку відновлюваних джерел енергії, оскільки воно сприяє зменшенню викидів парникових газів та залежності від традиційних джерел енергії.

Біогаз - це відхід метаболізму спеціальних мікроорганізмів, що розвиваються на будь-яких субстратах біологічного походження в анаеробних умовах. Відповідний біологічний процес розвитку мікроорганізмів з утворенням біогазу називають метановим бродінням, оскільки основний компонент біогазу – це метан; частка метану в біогазі від 50 до 70%, решта припадає переважно на вуглекислий газ.

Метанове бродіння – найдавніший землі біологічний процес, що протікає безперервно, повсюдно (переважно – у місцях накопичення органічних відходів) й у великих масштабах; все, що відмирає в Природі,

все, що використовує людина і потім викидає як непотрібне, Природа переробляє з використанням метаногенних бактерій і метан, що при цьому утворюється, потрапляє в атмосферу, що посилює її парниковий ефект. Лише порівняно недавно людство усвідомило, що метаноутворюючі бактерії треба «покликати на службу», бо біогаз – це чудове паливо, яке можна виробляти з кидкової сировини, а здійснивши метанове бродіння з урахуванням усіх досягнень в галузі біотехнології, можна виробляти біогаз інтенсивно, дешево і в більших обсягах, одночасно допомагаючи Природі справлятися зі знищенням відходів. З сировини рослинного походження першочерговою сировиною, що особливо потребує переробки в біогаз, є відпрацьовані технологічні розчини або стічні води різних виробництв, у яких переробляють рослинну сировину (наприклад, виробництва харчових продуктів, целюлози та ін.).[1]

# РОЗДІЛ 3.ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ СКЛОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Виробництво скла — це складний процес, що охоплює кілька етапів, починаючи від підготовки сировини. Основні компоненти, такі як пісок, сода та вапно, плавлять у високотемпературній печі, утворюючи розплавлену скляну масу.

Далі розплавлене скло може бути сформоване за допомогою різних технік, таких як ручне моделювання чи використання форм та прес-форм. Деякі види скла можуть бути розтягнуті чи витягнуті для досягнення бажаних розмірів та форм.

Після формування скляні вироби проходять процес охолодження, піддаються обробці поверхні, а також можуть піддаватися закалюванню для збільшення міцності. Кінцевий етап включає упаковку готової продукції для забезпечення безпеки та зручності транспортування. Технології та обладнання для скловарного виробництва різняться від ручних методів до автоматизованих ліній для масового виробництва, залежно від типу скляних виробів, що виробляються.[14]

Основні етапи та технології скловарного виробництва виглядають наступним чином:

1. **Підготовка сировини:**
   - *Плавлення сировини:* Головною сировиною для виробництва скла є пісок (кварцовий пісок), сода, і вапно. Ці компоненти плавлять у високотемпературній печі, де вони утворюють розплавлену скляну масу.
2. **Формування скляного виробу:**
   - *Гаряче формування:* Розплавлене скло формують за допомогою різноманітних технік, таких як ручна робота або використання форм та прес-форм.

- *Лиття:* Деякі види скляних виробів можуть бути виготовлені методом лиття в форми.

3. **Обробка та охолодження:**
   - *Розтягування та витягування:* Деякі види скла можуть бути розтягнуті або витягнуті, щоб отримати бажаний розмір та форму.
   - *Охолодження:* Скляні вироби піддаються контрольованому процесу охолодження, щоб забезпечити стабільність та міцність.
4. **Обробка поверхні та обробка країв:**
   - *Шліфування:* Деякі скляні вироби можуть піддаватися шліфуванню для поліпшення якості поверхні.
   - *Обробка країв:* Краї скляних виробів можуть бути оброблені для уникнення травм при дотику.
5. **Обробка поверхні та обробка країв:**
   - *Закалка:* Деякі скляні вироби можуть піддаватися процесу закалювання для збільшення їхньої міцності та стійкості.
6. **Виробництво масових серій та упаковка:**
   - *Автоматизовані лінії:* У великих скловарнях використовуються автоматизовані лінії для масового виробництва.
   - *Упаковка:* Готові скляні вироби піддаються упаковці для забезпечення безпеки та зручності транспортування.

Технологія та обладнання для скловарного виробництва різняться в залежності від типу скляних виробів, які виробляються, і варіюють від ручного виготовлення до повністю автоматизованих виробництв.[14]

## 3.1 Загальна характеристика фізико-хімічних процесів виробництва скломаси

Хімічна стійкість скла. Не всі види скла, особливо несилікатні, є нерозчинними у водних розчинах. Розчинення скла в воді залежить від різних факторів, і на кожному етапі може відбуватися різні процеси.

Так, комерційні силікатні скла, які використовуються для виготовлення посуду, не завжди можна вважати абсолютно нерозчинними у воді. Особливо це стосується несилікатних скель, які часто можуть взаємодіяти з водою, обмежуючи їхнє використання для будь-яких застосувань, пов'язаних із змочуванням водою чи водяною парою.

Під час розчинення скла в водних розчинах можуть відбуватися різні процеси. Наприклад, якщо в склі є алкалійні або інші високорухливі іони, може відбуватися іонний обмін між цими іонами та протонними видами з рідини. Також може відбуватися конгруентне розчинення, коли рідина безпосередньо атакує мережеві зв'язки скла з постійною швидкістю, і цей процес може відбуватися для будь-якого скла. Окрім того, на поверхні скла можуть утворюватися шари реакційних продуктів, які впливають на подальшу швидкість розчинення матеріалу.

У силікатних склах, які містять алкалійні іони, зазвичай відбувається іонний обмін з протонними видами з рідини. Іонний обмін – це процес, який контролюється дифузією, і глибина проникнення водню і збільшення концентрації алкалійних іонів з часом зростає за квадратним коренем часу.[15]

Конгруентне розчинення відбувається паралельно із іонним обміном, і на великий термін конгруентне розчинення домінує процес розчинення, і товщина обміненого шару стає незалежною від часу. Якщо оцінювати хімічну стійкість за виміром втрати маси, то початкова швидкість втрати

маси змінюється з квадратним коренем часу, переходячи до лінійної втрати з часом на довготривалий термін.

Умови розчинення, такі як відношення об'єму розчину до площі зразка та pH, мають сильний вплив на швидкість розчинення скла. Наприклад, екстремальні значення pH (більше 9 або менше 1) часто призводять до швидкого розчинення скла. Додатки певних елементів можуть також змінювати механізм розчинення скла.[15]

## Підготовка сировини

Підготовка сировини включає в себе вибір сировини на основі її хімічного складу, чистоти, однорідності та розміру частинок. У склад партії входить пісок для отримання кремнію, тоді як модифікатори вводяться у вигляді карбонатів замість оксидів для зменшення енергетичних витрат . Вибір партії адаптований до кінцевого продукту; наприклад, для виробництва волокна потрібно більше відбору та дрібнішого розміру частинок сировини, ніж для виробництва контейнерів. Також вологість сировини контролюється за допомогою ІЧ-аналізатора на сучасних лініях виробництва; крім того, перевіряються концентрації домішок (Fe, Ni). Переробка скла стала важливим параметром на цьому етапі і дозволяє зекономити енергію, оскільки для плавлення сировини, змішаної із переробленим склом, потрібно менше енергії. Виробники плоского скла переробляють до 30% власного скла, тоді як в домашньому відновленні контейнерів вже стало широко поширеним (у Європі, наприклад, переробляється від 60% до 90% домашньої упаковки). Перероблені контейнери розділяються в залежності від їхнього кольору для оптимізації отриманого продукту. Також переробка може вносити керамічні домішки, які реагують з розплавленим склом та присутні у вигляді включень у

готовому продукті. Металеві та органічні домішки створюють нестабільність під час обробки скла (через реакції окиснення/відновлення) та погіршують якість скла. Процеси доставки, змішування та розмірювання є дуже абразивними, а обладнання містить металеві та керамічні покриття. Таким чином, існує ризик забруднення від інструментів, і, фактично, вважається, що частки сульфіду нікелю формуються від нікелю, що міститься в таких інструментах, та від сірки, яку вводять продукти згоряння і які відповідальні за затримку тріщин в закалених віконних блоках.[14]

## Плавлення

Процес плавлення включає в себе складні хімічні та фізичні явища. Для виготовлення скла типу сода-лім-кремній потрібно значно більше енергії, ніж теоретично обчислена термодинамічна вартість 2,7 МДж/кг. З 1,2 кг сировини 1 кг утворює скло, а 0,2 кг утворює газ, головним чином CO2. Ці великі об'єми газу допомагають у фільтрації скла.

Зерна піску та вуглекислого натрію реагують за рівняннями:

$$2SiO2+Na2CO3 \rightarrow Na2SiO3+CO2.$$

У той час як карбонат кальцію перетворюється так:

$$CaCO3 \rightarrow CaO+CO2.$$

Для плавлення частинок сировини та їх перетворення в скло використовують печі для виробництва скла. Речовини з низькою температурою плавлення (оксиди лужних металів) плавляться та розчиняють вищотемпературні складові, такі як кварц та алюміна. Різні печі використовуються для виробництва контейнерів, скловолокна, плоского

скла та спеціального скла. Їх можна розділити на ті, які підігріваються електрично, та ті, які підігріваються в основному з використанням згоряння пального.[14]

Виробництво скломаси є складним фізико-хімічним процесом, який включає в себе кілька ключових етапів. Нижче подано загальну характеристику фізико-хімічних процесів, які відбуваються під час виробництва скломаси:

1. **Вибір сировини:** Процес розпочинається вибором високоякісних сировинних матеріалів, таких як кварцовий пісок, сода, вапно, оксид алюмінію тощо. Якість і чистота цих матеріалів визначають якість кінцевого продукту.
2. **Суміш і підготовка сировини:** Сировинні матеріали змішуються в певних пропорціях та піддаються підготовці. Це може включати подрібнення, сушіння та інші обробки для отримання однорідної маси.
3. **Плавлення:** Суміш сировини плавиться при високій температурі (більше 1700 градусів Цельсія) в печах. Під час плавлення відбувається зв'язування компонентів і утворення скломаси.
4. **Формування:** Рідка скломаса формується в потрібну форму за допомогою форм або валків. Цей етап може включати також охолодження скла для надання йому стабільності.
5. **Охолодження і отримання готового продукту:** Сформована скломаса повільно охолоджується для видалення внутрішніх напруг і забезпечення стійкості продукту. Отримана скляна маса готова для наступних етапів виробництва, таких як виробництво скловиробів або інших скляних виробів.
6. **Аналіз і контроль якості:** На кожному етапі виробництва

проводиться аналіз і контроль якості для перевірки відповідності продукції стандартам і вимогам.

Ці фізико-хімічні процеси виробництва скломаси взаємодіють і визначають властивості кінцевого скляного матеріалу, такі як прозорість, міцність, стійкість до температурних змін і інші характеристики.

## 3.2 Конструкція та принцип дії скловарних печей

Скловарні печі використовуються для плавлення та формування скломаси в процесі виробництва скляних виробів. Їх конструкція та принцип дії включають кілька основних елементів:

1. **Камера плавлення:**
   - *Матеріали піддону:* У цій частині печі розташовані сировинні матеріали, такі як кварцовий пісок, сода, вапно, оксиди металів та інші. Вони розміщуються на піддоні або подвійній підвісці, щоб утворити рідку скломасу під впливом високої температури.
   - *Пічовий рефракційний матеріал:* Стінки та днище камери виготовлені з високотемпературних рефракторних матеріалів, здатних витримувати високі температури плавлення скла.
   - *Обігрів:* Камера обігрівається електричними опірними нагрівальними елементами або газовими горілками, що створює високу температуру для плавлення сировини.
2. **Зона формування:**
   - *Формувальний відділ:* Після плавлення скломаса потрапляє в цю зону, де вона може бути формована за допомогою спеціальних форм, валків чи інших пристроїв.
   - *Охолодження та стабілізація:* Сформована скляна маса потім

повільно охолоджується для зменшення внутрішніх напруг і надання стійкості.

3. **Система управління:**
   - *Терморегуляція:* Печі обладнані системами терморегуляції, які контролюють температуру в різних частинах печі, забезпечуючи оптимальні умови для плавлення та формування скломаси.
   - *Автоматизація:* Деякі скловарні печі мають автоматизовані системи управління, які контролюють процеси плавлення та формування, що забезпечує точність та ефективність виробництва.

Загалом, принцип дії скловарних печей полягає в створенні оптимальних умов для плавлення та обробки скломаси, а конструкція спроектована таким чином, щоб забезпечити надійність та ефективність виробничого процесу.[14]

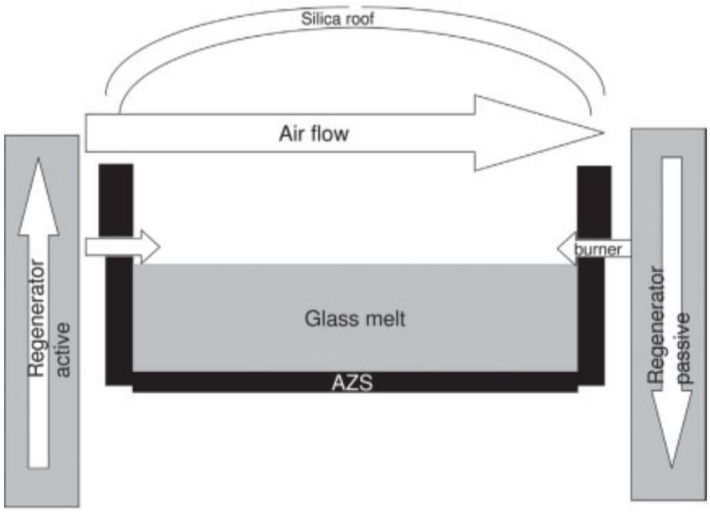



Рис.3. Схема скловарної печі. Горіння і потік повітря чергуються, регенератори відповідно активні або пасивні

Схема скловарської печі передбачає циклічний процес, де чергуються фази спалювання та подачі повітря, і регенератори взаємодіють як активні чи пасивні відповідно. Цей дизайн широко використовується для

максимізації енергоефективності при плавленні скла.

Ось загальне пояснення схеми:

1. **Фаза спалювання (активний регенератор):**
   - Паливо (наприклад, природний газ) спалюється в пальниці печі.
   - Гарячі гази згоряння проходять через систему каналів в активному регенераторі.
   - Регенератор поглиблює тепло вихідних димових газів, накопичуючи його для наступної фази.
2. **Фаза подачі повітря (активний регенератор):**
   - Напрямок подачі повітря змінюється.
   - Холодний повітря нагрівається, проходячи через регенератор, який поглибив тепло в попередній фазі.
   - Нагріте повітря направляється в пальну камеру.
3. **Фаза спалювання (пасивний регенератор):**
   - Паливо знову спалюється в пальниці печі.
   - Цього разу гарячі гази згоряння проходять через систему каналів в іншому (пасивному) регенераторі.
   - Пасивний регенератор поглиблює тепло вихідних димових газів, накопичуючи його для наступної фази.
4. **Фаза подачі повітря (пасивний регенератор):**
   - Напрямок подачі повітря знову змінюється.
   - Холодний повітря нагрівається, проходячи через пасивний регенератор, який поглибив тепло в поточній фазі спалювання.
   - Нагріте повітря направляється в пальну камеру для наступної фази спалювання.

Цей циклічний процес дозволяє неперервне нагрівання і підігрівання, використовуючи накопичене тепло з регенераторів. Чергування активних та

пасивних регенераторів забезпечує неперервне і ефективне постачання переднагрітого повітря для спалювання.[14]

Регенератори відіграють важливу роль у цій системі, відновлюючи та повторно використовуючи тепло, підвищуючи енергоефективність та зменшуючи споживання палива у процесі плавлення скла.

### 3.3 Аналіз споживання енергії при виробництві скломаси

Аналіз споживання енергії при виробництві скломаси включає в себе розгляд різних етапів процесу виробництва та ідентифікацію споживання енергії на кожному етапі. Основні етапи, які впливають на споживання енергії в скловарній промисловості, включають:

1. **Підготовка сировини:**
   - Енергія витрачається на видобуток та транспортування сировинних матеріалів, таких як кварцовий пісок, сода, вапно, оксиди металів тощо.
2. **Плавлення скломаси:**
   - Значна кількість енергії витрачається на нагрівання сировини до високих температур, необхідних для плавлення скломаси. Це може вимагати великої потужності від нагрівальних елементів або горілок.
3. **Формування скломаси:**
   - Енергія також використовується під час формування скломаси в кінцевий продукт. Це може включати процеси формування, охолодження та стабілізації скла.
4. **Охолодження та обробка готового продукту:**
   - Етап охолодження вимагає спеціальних систем для контролю

температури та забезпечення ефективного охолодження скла, що також може вимагати значної кількості енергії.

5. **Транспортування та упакування:**
   - Енергія споживається при транспортуванні та упакуванні готового скляного продукту для подальшого використання або продажу.
6. **Управління та автоматизація:**
   - Системи управління та автоматизації можуть використовувати енергію для забезпечення ефективності та точності в управлінні процесами виробництва.

Зменшення споживання енергії у скловарній промисловості може бути досягнуте за допомогою вдосконалення технологій, використання відновлюваних джерел енергії, оптимізації процесів та впровадження енергозберігаючих технологій. Також важливо проводити постійний моніторинг та аналіз споживання енергії для визначення можливостей подальшого вдосконалення енергоефективності.[14]

# РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОГАЗУ В СКЛОВАРНИХ ПЕЧАХ

## 4.1 Вихідні дані для розрахунку

Скловарна піч ванного типу для вироблення листового скла продуктивністю $G$ = 150 т скломаси на добу. Паливо – природний газ. Склад газу: $CH_4$ – 93,2 %; $C_2H_6$ – 0,7 %; $C_3H_8$ – 0,6 %; $C_4H_{10}$ – 0,6 %; $N_2$ – 4,4 %; $CO_2$ – 0,5 %. Коефіцієнт надлишку повітря в пальнику – α = 1,1. Питоме знімання скломаси із дзеркала варильної частини печі σ = 800 кг/(м$^2$·добу). Теоретична витрата теплоти на варіння 1 кг скломаси заданого складу $q_{ск}$ = 2930 кДж/кг. Температура варіння скломаси $t_{ск}$ = 1550 °С. Температура прямого і зворотного потоків скломаси в печі $t_{ск.\ пр.}$ = 1350 °С, $t_{ск.\ зв}$=1250 °С. Температура навколишнього середовища $t'_п$ = 20 °С. Температура підігріву повітря в регенеративних теплообмінниках $t''_п$ = 1000 °С.

## 4.2 Тепловий баланс скловарної печі

Теплота згорання природного газу:

$$Q_н^р = 358 \cdot CH_4 + 637 \cdot C_2H_6 + 912 \cdot C_3H_8 + 1186 \cdot C_4H_{10}; \quad (4.1)$$

$$Q_н^р = 358 \cdot 93{,}2 + 637 \cdot 0{,}7 + 912 \cdot 0{,}6 + 1186 \cdot 0{,}6 = 35070 \text{ кДж/м}^3.$$

Теоретично необхідна кількість повітря горіння для 1 м$^3$ природного газу:

$$V^0 = 0{,}0476\left(0{,}5 \cdot CO + 0{,}5 \cdot H_2 + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot C_mH_n - O_2\right); \quad (4.2)$$

$$V^0 = 0{,}0476\left(2 \cdot 93{,}2 + 3{,}5 \cdot 0{,}7 + 5 \cdot 0{,}6 + 6{,}5 \cdot 0{,}6\right) = 9{,}32 \text{ м}^3/\text{ м}^3.$$

Дійсний об’єм повітря горіння для 1 м$^3$ природного газу:

$$V_n = \alpha \cdot V^0; \quad (4.3)$$

$$V_{п} = 1{,}1 \cdot 9{,}32 = 10{,}25 \text{ м}^3/\text{ м}^3.$$

Кількість складових продуктів згоряння на 1 м$^3$ природного газу:

$$V_{CO_2} = \left(CO + CO_2 + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12}\right)/100; \quad (4.4)$$

$$V_{CO_2} = \left(0{,}5 + 93{,}2 + 2 \cdot 0{,}7 + 3 \cdot 0{,}6 + 4 \cdot 0{,}6\right)/100 = 0{,}993 \text{ м}^3/\text{ м}^3;$$

$$V^0_{H_2O} = \left(H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + H_2O\right)/100 + 0{,}0161 \cdot V^0; \quad (4.5)$$

$$V^0_{H_2O} = \left(2 \cdot 93{,}2 + 3 \cdot 0{,}7 + 4 \cdot 0{,}6 + 5 \cdot 0{,}6\right) \cdot \frac{1}{100} + 0{,}0161 \cdot 9{,}32 = 2{,}089 \text{ м}^3/\text{ м}^3;$$

$$V^0_{N_2} = \left(N_2 + 79 \cdot V^0\right) \cdot \frac{1}{100}; \quad (4.6)$$

$$V^0_{N_2} = \left(4{,}4 + 79 \cdot 9{,}32\right) \cdot \frac{1}{100} = 7{,}407 \text{ м}^3/\text{ м}^3;$$

$$\Delta V_{п} = \left(\alpha - 1\right) \cdot V^0; \quad (4.7)$$

$$\Delta V_{п} = 0{,}1 \cdot 9{,}32 = 0{,}932 \text{ м}^3/\text{ м}^3.$$

Загальна кількість продуктів згоряння на 1 м$^3$ природного газу:

$$V_{п.с} = V_{CO_2} + V^0_{H_2O} + V^0_{N_2} + \Delta V_{п}; \quad (4.8)$$

$$V_{п.с} = 0{,}993 + 2{,}089 + 7{,}407 + 0{,}932 = 11{,}27 \text{ м}^3/\text{ м}^3.$$

Об’ємні частки продуктів згоряння визначаються за формулою

$$r_i = \frac{V_i}{V_{п.з}} \cdot 100; \quad (4.9)$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{0{,}993}{11{,}27} \cdot 100 = 8{,}81 \ \ \%;$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{1{,}939}{11{,}27} \cdot 100 = 17{,}21 \ \ \%;$$

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{8{,}14}{11{,}27} \cdot 100 = 72{,}24 \ \ \%;$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{0{,}196}{11{,}27} \cdot 100 = 1{,}74 \ \ \%.$$

Тепловий баланс варильної частини печі. Привхідна частина теплового балансу:

Тепловий потік, що поступає при згорянні природного газу:

$$Q_1 = Q_н \cdot B; \tag{4.10}$$

$$Q_1 = 35070 \cdot B \ \text{кВт},$$

де В – витрата палива, м$^3$/с.

Фізична теплота, що поступає з нагрітим повітрям горіння:

$$Q_2 = V_п \cdot c_{г.п} \cdot t_{г.п} \cdot B; \tag{4.11}$$

$$Q_2 = 10{,}25 \cdot 1{,}41 \cdot 950 \cdot B = 13730 \cdot B \ \text{кВт},$$

де $c_{г.п} = 1{,}41$ кДж/(м$^3$·°С) – питома теплоємність повітря при температурі нагріву в регенеративному теплообміннику.

Потоки фізичної теплоти природного газу, шихти, склобою не враховуються, оскільки вони є незначними.

Загальний привхідний тепловий потік складає

$$Q_{привх} = Q_1 + Q_2; \tag{4.12}$$

$$Q_{привх} = 35070 + 13730 = 48800 \cdot B \text{ кВт.}$$

Витратна частина теплового балансу.

На процеси склоутворення:

$$Q_1 = q_{ск} \cdot g, \tag{4.13}$$

де продуктивність печі по скломасі визначається як

$$g = \frac{G \cdot 1000}{24 \cdot 3600}; \tag{4.14}$$

$$g = \frac{64 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} = 0{,}74 \text{ кг/с.}$$

Розхраховуємо тепловий потік як

$$Q_1 = 2950 \cdot 0{,}74 = 2185{,}2 \text{ кВт.}$$

Втрата теплоти з відхідними димовими газами:

$$Q_2 = V_{п.з} \cdot c_{п.з} \cdot t_{п.з} \cdot B, \tag{4.15}$$

де $t_{п.з} = 1400°C$ – температура димових газів на виході з робочої камери печі.

Питома теплоємність продуктів згорання визначається як теплоємність суміші окремих газів:

$$c_{п.з} = c_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + c_{H_2O} \cdot r_{H_2O} + c_{N_2} \cdot r_{N_2} + c_{O_2} \cdot r_{O_2}; \tag{4.16}$$

$$c_{\text{п.з}} = 2{,}335 \cdot 0{,}0881 + 1{,}853 \cdot 0{,}1721 + 1{,}444 \cdot 0{,}7224 + 1{,}529 \cdot 0{,}0174 = 1{,}594 \text{ кДж/(м}^3\cdot^\circ\text{С)}.$$

Розраховуємо тепловий потік:

$$Q_2 = 11{,}27 \cdot 1{,}594 \cdot 1400 \cdot B = 25150 \cdot B \text{ кВт}.$$

Втрати теплоти шляхом випромінюванням:

$$Q_3 = \frac{C_0 \cdot \varphi \cdot F\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]}{1000}, \quad (4.17)$$

де $C_0$ = 5,7 Вт/(м$^2$·К$^4$) – коефіцієнт випромінювання;

φ – коефіцієнт діафрагмування; залежить від форми, геометрії отворів і товщини стінки;

$F$ – загальна площа поверхні, що випромінює;

$T_1$ і $T_2$ – температури середовища, що випромінює (гази), і середовища, що сприймає випромінювання (стінка), К.

Випромінювання в частину остудження печі. Отвір являє собою прямокутник з висотою $H$ = 0,2 м, шириною $b_{\text{ст}}$ = 6,45 м, товщиною арки δ = 0,3 м.

Тоді співвідношення

$$\frac{H}{\delta} = \frac{0{,}2}{0{,}3} = 0{,}66.$$

За співвідношенням $H$/δ знаходимо φ = 0,6.

Площа випромінювання:

$$F = b \cdot H; \quad (4.18)$$

$$F = 6{,}45 \cdot 0{,}2 = 1{,}29 \text{ м}^2.$$

Температура перед екраном в полум'яному просторі печі $t_1$ = 1400 °С, за екраном $t_2$ = 1350 °С.

Після цього визначаємо тепловий потік:

$$Q_a = \frac{5{,}7 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}29\left[\left(\frac{1673}{100}\right)^4 - \left(\frac{1623}{100}\right)^4\right]}{1000} = 39{,}5 \text{ кВт}.$$

Випромінювання через кишеню завантаження. Коефіцієнт φ = 0,6 знаходимо при наступних даних: $b_{к.з}$ = 0,8 м; $H$ = 0,2 м; δ = 0,3 м; $H$/δ = 0,2/0,3 = = 0,66.

Загальна площа випромінювання двох кишень завантаження:

$$F = 2 \cdot b_{к.з} \cdot H; \tag{4.19}$$

$$F = 2 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}2 = 0{,}32 \text{ м}^2.$$

Температура в зоні засипки шихти – $t_1$ = 1400 °С, температура навколишнього середовища – $t_2$ = 20 °С.

Визначаємо тепловий потік:

$$Q_б = \frac{5{,}7 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}32\left[\left(\frac{1673}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4\right]}{1000} = 85{,}7 \text{ кВт}.$$

Випромінювання у влети пальників. Загальна площа влетів складає 3 % площі варильної частини:

$$F_{вл} = 0{,}03 \cdot F_{вар}; \tag{4.20}$$

$$F_{вл} = 0{,}03 \cdot 52 = 1{,}56 \text{ м}^2.$$

Висота влетів – 0,4 м, висота та довжина отворів – $H$ = 0,4 м; δ = 0,5 м.

Тоді

$$\frac{H}{\delta} = \frac{0{,}4}{0{,}5} = 0{,}8; \quad \varphi = 0{,}66.$$

Середня температура в полум'яному просторі варильної частини печі складає $t_1$ = 1500 °С, а температура внутрішніх стінок пальникових пристроїв

$t_2$ = 1400 °С.

Визначаємо тепловий потік:

$$Q_в = \frac{5{,}7 \cdot 0{,}66 \cdot 1{,}56\left[\left(\frac{1773}{100}\right)^4 - \left(\frac{1673}{100}\right)^4\right]}{1000} = 120{,}2 \text{ кВт}.$$

Загальний тепловий потік, що втрачається шляхом випромінювання:

$$Q_3 = Q_а + Q_б + Q_в; \tag{4.21}$$

$$Q_3 = 39{,}5 + 85{,}7 + 120{,}2 = 245{,}4 \text{ кВт}.$$

Тепловий потік, що втрачається на нагрів зворотних потоків скломаси:

$$Q_4 = (n-1) \cdot g \cdot (t_1 \cdot c_1 - t_2 \cdot c_2), \tag{4.22}$$

де $n$ – коефіцієнт потоку, є співвідношенням кількості скломаси, яка поступає в частину вироблення, до кількості скломаси, що вже вироблена. Приймаємо $n$ = 3,5;

$c_1$, $c_2$ – питомі масові теплоємності скломаси;

$t_1$ = 1300 °С, $t_2$ = 1200 °С – температури прямого і зворотного потоків скломаси:

$$c_{ск} = (0{,}1605 + 0{,}00011 \cdot t_{ск}) \cdot 4{,}19; \tag{4.23}$$

$$c_1 = (0{,}1605 + 0{,}00011 \cdot 1300) \cdot 4{,}19 = 1{,}2717 \text{ кДж/(кг·°С);}$$

$$c_2 = (0{,}1605 + 0{,}00011 \cdot 1200) \cdot 4{,}19 = 1{,}2256 \text{ кДж/(кг·°С).}$$

Визначаємо тепловий потік:

$$Q_4 = (3{,}5 - 1) \cdot 0{,}74 \cdot (1300 \cdot 1{,}2717 - 1200 \cdot 1{,}2256) = 337{,}9 \text{ кВт.}$$

Тепловий потік, що втрачається в навколишнє середовище через вогнетривку кладку печі:

$$Q_5 = \frac{t_{вн} - t_п}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F, \tag{4.24}$$

де $t_{вн}$ – температура внутрішньої поверхні кладки;

$t_п$ – температура навколишнього повітря;

δ – товщина кладки;

λ – теплопровідність вогнетривів кладки;

$\alpha_2$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні кладки до навколишнього повітря.

Якщо записати

$$\frac{t_{вн} - t_з}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = q, \tag{4.25}$$

то формула буде мати такий вигляд:

$$Q_5 = q \cdot F. \tag{4.26}$$

Результати розрахунку теплового потоку, що втрачається в навколишнє середовище, представлений в табл. 4.1. Тут температури внутрішніх поверхонь кладки приймаються згідно з експериментальними даними, значення теплопровідності матеріалів λ – згідно з довідковими даними.

Таблиця 4.1 – Тепловий потік, що втрачається через кладку печі в навколишнє середовище

| Ділянка печі | δ, м | λ, Вт/(м·К) | r = ∑δ/λ | $t_{вн}$, °С | q, кВт/м$^2$ | F, м$^2$ | $Q_5$, кВт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Дно | 0,3 | 1,16 | 0,298 | 100 | 3,146 | 64,14 | 201,8 |
| Дно | 0,1 | 2,56 | | | | | |
| Стіни басейну: верхній ряд | 0,25 | 2,56 | 0,098 | 1400 | 12,32 | 15,93 | 196,26 |
| Середній і нижній ряди | 0,25 | 2,56 | 0,098 | 1200 | 10,05 | 26,55 | 266,83 |
| Стіни полум'яного простору | 0,5 | 1,75 | 0,286 | 1500 | 5,104 | 26,35 | 134,48 |
| Склепіння | 0,3 | 1,75 | 0,171 | 1500 | 8,18 | 61,81 | 505,55 |
| Заклинок | 0,25 | 1,75 | 0,143 | 1500 | 9,71 | 1,87 | 18,16 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Всього | - | - | - | - | - | - | 1323 |

Тепловий потік, що втрачається з димовими газами через нещільності, складає 3 % від привхідної теплоти:

$$Q_6 = 0{,}03 \cdot Q_{привх}; \tag{4.46}$$

$$Q_6 = 0{,}03 \cdot 48800 \cdot B = 1464 \cdot B \text{ кВт.}$$

Неврахований тепловий потік, пов’язаний зі зносом печі та її руйнуванням при експлуатації, складає 10 % від привхідної теплоти:

$$Q_7 = 0{,}1 \cdot Q_{привх}; \tag{4.47}$$

$$Q_7 = 0{,}1 \cdot 48800 \cdot B = 4880 \cdot B \text{ кВт.}$$

Далі складаємо рівняння теплового балансу печі та визначаємо витрату природного газу:

$$Q_{привх} = Q_{витр}; \tag{4.48}$$

$$48800 \cdot B = 2185{,}2 + 25150 \cdot B + 245{,}4 + 337{,}9 + 1323 + 1464 \cdot B + 4880 \cdot B;$$

$$17306 \cdot B = 4091{,}5;$$

$$B = \frac{4091{,}5}{17306} = 0{,}22 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Складаємо підсумкову таблицю теплового балансу (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Підсумкова таблиця теплового балансу печі

| Привхідна частина | Кількість теплоти | | Витратна частина | Кількість теплоти | |
|---|---|---|---|---|---|
| | кВт | % | | кВт | % |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Хімічна теплота палива | 12372,11 | 79,15 | На реакції склоутворення | 2185,19 | 14 |
| Фізична теплота повітря | 3259,86 | 20,85 | Втрати з димовими газами | 9508,47 | 60,8 |
| **Всього** | 15632,08 | 100 | Втрати випромінюванням | 245,34 | 1,5 |
| | | | На нагрів зворот. потоків скломаси | 337,92 | 2,2 |
| | | | Втрати в навколишнє середовище | 1323,04 | 8,5 |
| | | | Втрати через нещільності печі | 468,96 | 3 |
| | | | Невраховані втрати | 1563,18 | 10 |
| | | | **Всього** | 15632,08 | 100 |

Розраховуємо основні техніко-економічні показники роботи.

Питома добова продуктивність печі по скломасі з 1 м$^2$ її варильної частини:

$$\sigma = \frac{G}{F_{вар}}; \tag{4.49}$$

$$\sigma = \frac{64000}{52} = 1235 \text{ кг/(м}^2\text{·добу).}$$

Питома витрата теплоти на варіння 1 кг скломаси:

$$Q_{пит} = \frac{Q_н \cdot B}{g}; \tag{4.50}$$

$$Q_{пит} = \frac{35070 \cdot 0,22}{0,74} = 11137$$ кДж/кг скломаси.

Питома витрата природного газу:

$$b_{пит} = \frac{b}{g}; \tag{4.51}$$

$$b_{пит} = \frac{0,22}{0,74} = 0,3$$ м$^3$/кг скломаси.

## 4.3 Визначення кількості біогазу для подачі в піч

Пропонується для заміни частини природного газу використання його суміші з біогазом. Склад біогазу для подальших розрахунків наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Склад біогазу

| Склад палива, % | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $CH_4$ | $N_2$ | $O_2$ | $CO_2$ | $H_2S$ |
| 55 | 4,5 | 0,5 | 40 | - |

Для оцінки можливості застосування біогазу необхідно провести розрахунки процесів горіння суміші палив з різним вмістом біопалива за формулами, наведеними в підрозділі 4.2. Склад суміші газу визначається за формулою

$$X_{см} = X_1(1 - g_1) + X_2 \cdot g_2,$$

де $X_1, X_2$ – вміст кожного газу в суміші, %; $g_1, g_2$ – частки кожного із газів в суміші.

Результати проведених розрахунків представлені в таблиці 4.4.

Як видно з табл. 4.4, теплота згоряння біогазу майже в 2 рази менше, ніж у природного, тому використання його без додавання висококалорійного палива в даному випадку неможливо. У зв'язку з цим пропонується використання біогазу в якості добавки в процесі спалювання природного газу. В таблиці наведені результати розрахунків спалювання природного газу – 100 %, біогазу – 100 % та їх суміші при вмісті біогазу *g* від 10 до 20 %. У всіх варіантах температура підігріву повітря горіння в регенераторі теплообміннику – 1000 °С. Результати розрахунків показали, що адіабатна температура горіння при додаванні біогазу газу зменшується з 2560 °С (100 % природного газу) до 2531 °С (суміш 80 % природного та 20 % біогазу).

Таблиця 4.4. Розрахунки горіння палива різного складу

| Вид палива | Об'єм повітря горіння $V_п$, м$^3$/м$^3$ | Об'єм димових газів $V_г$, м$^3$/м$^3$ | Теплота згоряння $Q^с_н$, кДж/м$^3$ | Адіабатна температура горіння $t_а$, °С |
|---|---|---|---|---|
| Природний газ | 10,25 | 11,4 | 35075 | 2560 |
| Біогаз | 5,73 | 6,83 | 19690 | 2348 |
| Природний +біогаз (90 %+10 %) | 9,96 | 11 | 33534 | 2546 |
| Природний | 9,57 | 10,8 | 32765 | 2539 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| +біогаз (90 %+15 %) | | | | |
| Природний +біогаз (90 %+20 %) | 9,35 | 10,5 | 31996 | 2531 |

З урахуванням необхідності підтримання визначеного технологією скловарного виробництва допустимого коливання температур в печі, доцільно обмежити частку біогазу в паливній суміші 10 %. Це дозволить використовувати його без заміни основного технологічного обладнання скловарного виробництва. При цьому зменшення адіабатної температури складає 21 °С. Така заміна також буде впливати на рівень підігріву температури повітря горіння, що подається в пальники печі, що потребує проведення розрахунків роботи регенеративних теплообмінників.

## 4.4 Розрахунок регенеративного теплообмінника скловарної печі за умов застосування біопалива

Час циклів нагрівання й охолодження в регенераторі – по 30 хв. кожний. Початкова температура повітря $t_{п}'$= 55 ºС; температура підігріву повітря в регенераторі $t_{п}''$= 1000 ºС; початкова температура продуктів горіння на вході в регенератор $t'_{пг}$ = 20 ºС. Витрата продуктів горіння $V_{г}$. Витрата повітря, що підігріває $V_{п}$. Тип і матеріал насадки – табл. 4.5. Теплоакумулюючий елемент насадки – вогнетривка цегла з розмірами $l$ х $h$ х $\delta$.

Спочатку розрахуємо варіант за умов використання тільки

природного газу.

Таблиця 4.5

| $t_п'$, °С | $t_п''$, °С | $t'_{пг}$, °С | $V_г$, м$^3$/с | $V_п$, м$^3$/с | Склад димових газів | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $r_{CO2}$ | $r_{H2O}$ | $r_{N2}$ |
| 55 | 1000 | 1350 | 2,53 | 2,28 | 0,0881 | 0,1721 | 0,7224 |

Таблиця 4.6

| Тип насадки | Вид вогнетривів | Розмір каналів $a$ х $b$, мм | Зазор між цеглою $S$, мм | Розмір цегли, мм | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $l$ | $h$ | $\delta$ |
| Каупера | Шамот | 120х120 | 9 | 300 | 150 | 65 |

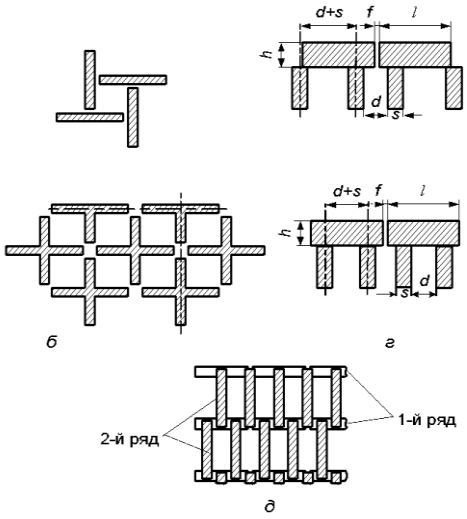



Рисунок 4.2. Насадка Каупера

Потік теплоти, що сприймається повітрям в насадці теплообмінника,

кВт:

$$Q_{\text{п}} = V_{\text{п}}\left(c''_{\text{п}}\, t''_{\text{п}} - c'_{\text{п}} t'_{\text{п}}\right), \text{ ,}$$

де $V_{\text{п}}$, м$^3$/с – витрата повітря з вихідних даних; $c_{\text{п}}{}''$ і $c_{\text{п}}{}'$ − питомі теплоємності повітря при $t''_{\text{п}}$ та $t'_{\text{п}}$ , кДж/(м$^3$·К).

Тепловий потік, що вноситься в насадку димовими газами, кВт:

$$Q'_{\text{пг}} = V_{\text{г}} c'_{\text{г}} t'_{\text{пг}}, \text{ ,}$$

де $V_{\text{г}}$, м$^3$/с – витрата димових газів згідно вихідних даних;

$c'_{\text{г}}$ – теплоємність димових газів теплоемкость газов, кДж/(м$^3$·К).

.

Тепловий потік, що виноситься з регенератора продуктами згоряння, кВт:

$$Q''_{\text{пг}} = 0{,}85 Q'_{\text{пг}} - Q_{\text{п}}, \text{ ,}$$

де 0,85 − коефіцієнт, що враховує тепловий потік, який втрачається у навколишнє середовище.

Температура продуктів горіння, що виходять із |регенератора: $t''_{\text{пг}} = \dfrac{Q''_{\text{пг}}}{V_{\text{г}}\, c''_{\text{г}}}$ ,

; ,

де $c''_{\text{пг}}$ − теплоємність димових газів на виході з регенератора, кДж/(м$^3$·К).

Таблиця 4.7 Тепловий баланс регенератора

| Прибуткові статті | Кількість теплоти | | Витратні статті | Кількість теплоти | |
|---|---|---|---|---|---|
| | кВт | % | | кВт | % |
| Внесено з димовими газами | | 100 | На нагрівання повітря | | 58,1 |
| | | | Винесення теплоти з димовими газами | | 26,9 |
| | | | Втрати в навколишнє середовище | 768 | 15 |
| Всього | | 100 | Всього | | 100 |

Площа поверхні нагріву насадки регенератора, м$^2$

$$F_{\text{нас}} = \frac{Q_{\Sigma} \cdot 1800}{\overline{K}\Delta\overline{t}} = \text{ м}^2,$$

де 1800 с − тривалість циклу роботи регенератора;

$Q_{\Sigma} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{нс}} =$ − тепловий потік на нагрівання повітря в насадці та втрати в навколишнє середовище.

Середня різниця температур теплоносіїв:

$$\Delta\overline{t} = \frac{t'_{\text{пг}} + t''_{\text{пг}}}{2} - \frac{t'_{\text{п}} + t''_{\text{п}}}{2} = .$$

Середній коефіцієнт теплопередачі в насадці за цикл регенератора, коефіцієнт теплопередачі конвекцією й випромінюванням для верху $K_{\text{в}}$ та низу насадки $K_{\text{н}}$:

$$\overline{K} = (K_в + K_н) / 2 = (9+5,36) / 2 = 7,18 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Коефіцієнт теплопередачі конвекцією й випромінюванням для низу насадки $K_н$, Вт/(м$^2$·К):

$$K = \frac{3,6}{\frac{1}{\alpha_г \tau_г} + \frac{1}{\alpha_п \tau_п} + \frac{\delta}{3\lambda_{нас}\tau}\left(1 - \frac{\delta^2 C_{нас}\rho}{108\lambda_{нас}\tau}\right)},$$

де $\tau_{пг}$, $\tau_п = 0,5$ – тривалість періоду нагрівання й охолодження, год.;

$C_{нас}$ – питома теплоємність насадки, $C_{нас}$=0,959 кДж/(кг·°С)

$\rho$ – густина матеріалу насадки, $\rho$ = 1850 кг/м$^3$;

$\delta$ – товщина елемента насадки, $\delta$ = 0,065 м;

$\lambda_{нас}$ – коефіцієнт теплопровідності насадки, $\lambda_{нас}$ = 1,04 Вт/(м·К);

$\alpha_г$ і $\alpha_п$ – коефіцієнти тепловіддачі від димових газів насадці та від насадки повітрю, Вт/(м$^2$·К).

Коефіцієнт тепловіддачі від димових газів насадці, Вт/(м$^2$·К):

$$\alpha_г = \alpha_к^г + \alpha_{випр}^г = 5,59+6,8 = 12,39 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

де $\alpha_к^г$, $\alpha_{випр}^г$ – коефіцієнти тепловіддачі від продуктів горіння насадці конвекцією та випромінюванням.

Тепловіддача від насадки повітрю здійснюється тільки за рахунок конвекції, Вт/ (м$^2$·К):

$$\alpha_п = \alpha_к^в = \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією в насадці визначається залежно

від її типу. Для насадки Каупера

$$\alpha_к = 0{,}86T^{0,25}w^{0,8}d_{екв}^{-0,33} = \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

де $w_п$ − швидкість повітря при його русі по насадці приймається 0,5 м/с; $w_г = w_п V_г / V_п = 0{,}55$ м/с − швидкість продуктів горіння в насадці;

$T$ − температура продуктів згоряння або повітря, $K$;

$d_{екв}$ − гідравлічний діаметр ячейки насадки, $d_{екв} = 0{,}12$ м.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м$^2$·К):

$$\alpha_{випр} = \frac{q_{випр}}{t_{пг} - t_{нас}} = \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

де $t_{нас} = \frac{t'_{пг} + t''_{п}}{2}$ = °С− температура насадки;

$q_{випр}$ − щільність теплового потоку, переданого шляхом випромінювання насадці від димових газів, Вт/м$^2$:

$$q_{випр} = C_0 \varepsilon_г \left(\frac{T_{пг}}{100}\right)^4 A = \text{ Вт/м}^2.$$

Тут $C_0$=5,7 Вт/(м$^2$·К$^4$) − коефіцієнт тепловіддачі випромінювання абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO2} + \beta\varepsilon_{H2O}$ − ступінь чорнуватості димових газів. Вона визначається за номограмами по значенням парційних тисків $P_{CO2}$, $P_{H2O}$ і товщини випромінюючого шару $S_{еф}$. Загальний тиск приймається 100 кПа і тоді

$P_{CO2} = r_{CO2}\cdot 100$, кПа и $P_{H2O} = r_{H2O}\cdot 100$, кПа.

Ефективна товщина шару газів у насадці приймається рівною розміру

каналу, тобто $S_{еф}$ = 0,12 м. За номограмами для $t'_{пг}$ знаходимо $\varepsilon_г = \varepsilon_{CO2} + \beta\varepsilon_{H2O}$.

$$P_{CO2} = r_{CO2} \cdot 100 = 0{,}09 \cdot 100 = 9 \text{ кПа};$$

$$P_{H2O} = r_{H2O} \cdot 100 = 0{,}17 \cdot 100 = 17 \text{ кПа};$$

$$P_{CO2} \cdot S_{еф} = 9 \cdot 0{,}12 = 1{,}05 \text{ кПа·м};$$

$$P_{H2O} \cdot S_{еф} = 17 \cdot 0{,}12 = 2{,}06 \text{ кПа·м}; \beta = 1{,}14;$$

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO2} + \beta\varepsilon_{H2O} = 0{,}062 + 1{,}14 \cdot 0{,}051 = 0{,}122,$$

$A = 1 - \left(\frac{T_{нас}}{T_{пг}}\right)^{3,6}$ – коефіцієнт зворотного випромінювання насадки.

.

Коефіцієнт теплопередачі конвекцією та випромінюванням для верху насадки $K_в$, Вт/(м$^2$·К):

$$K = \frac{3{,}6}{\frac{1}{\alpha_г \tau_г} + \frac{1}{\alpha_в \tau_в} + \frac{\delta}{3\lambda_{нас}\tau}\left(1 - \frac{\delta^2 C_{нас}\rho}{108\lambda_{нас}\tau}\right)},$$

де $\tau_{пг}$, $\tau_п$ = 0,5 – тривалість періоду нагрівання й охолодження, год.;

$C_{нас}$ – питома теплоємність насадки, $C_{нас}$=1,11 кДж/(кг·К);

ρ – щільність матеріалу насадки, ρ = 1850 кг/м$^3$;

δ – товщина елемента насадки, δ = 0,065 м;

$\lambda_{нас}$ – коефіцієнт теплопровідності насадки, $\lambda_{нас}$ = 1,42 Вт/(м·К);

$\alpha_г$ и $\alpha_п$ – коефіцієнти тепловіддачі від димових газів насадці та від насадки повітрю, Вт/(м$^2$·°С).

Коефіцієнт тепловіддачі від димових газів насадці визначається як, Вт/(м$^2$·К):

$$\alpha_г = \alpha_к^г + \alpha_{випр}^г = 6{,}82+45{,}74 = 52{,}16 \text{ Вт/(м}^2\cdot°\text{С)},$$

де $\alpha_к^г$, $\alpha_{випр}^г$ − коефіцієнти тепловіддачі від продуктів горіння насадці шляхом конвекції та випромінювання.

Тепловіддача від насадки повітрю здійснюється тільки за рахунок конвекції, Вт/ (м$^2$·К):

$$\alpha_п = \alpha_к^в = \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією визначається за наступною формулою:

$$\alpha_к = 0{,}86T^{0,25}w^{0,8}d_{екв}^{-0,33} = \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

де $w_п$ − швидкість повітря при його русі по насадці, приймається 0,5 м/с;

$w_г = w_п V_г / V_п = 0{,}55$ м/с − швидкість продуктів горіння в насадці; $T$ − температура продуктів горіння або повітря, $K$; $d_{екв}$ − гідравлічний діаметр перерізу каналу насадки, $d_{екв} = 0{,}12$ м.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м$^2$·К)

$$\alpha_{випр} = \frac{q_{випр}}{t_{пг} - t_{нас}} = \text{ Вт/(м}^2\cdot°\text{С)},$$

де $t_{нас} = \frac{t'_{пг}+t''_п}{2}$ = °С− температура насадки;

$q_{изл}$ − щільність теплового потоку, переданого випромінюванням

насадці від продуктів горіння, Вт/м$^2$.

$$q_{\text{випр}} = C_0 \varepsilon_г \left( \frac{T_{\text{пг}}}{100} \right)^4 A = \text{ Вт/м}^2.$$

Добуток парціального тиску на товщину шару газів $P_{CO2} \cdot S_{эф}$,

кПа·м и $P_{H2O} \cdot S_{эф}$, кПа·м. За номограмами при $t'_{\text{пг}}$,°С знаходимо $\varepsilon_г = \varepsilon_{CO2} + \beta\varepsilon_{H2O}$.

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO2} + \beta\varepsilon_{H2O} = 0{,}035 + 1{,}14 \cdot 0{,}022 = 0{,}0601,$$

$A = 1 - \left( \frac{T_{\text{нас}}}{T_{\text{пг}}} \right)^{3,6}$ – коефіцієнт зворотного випромінювання насадки.

Після визначення величин $\overline{K}$ і $F_{\text{нас}}$ знаходимо площу поверхні нагрівання 1 м$^3$ насадки, м$^2$/м$^3$:

$$f_{\text{пит}} = \frac{4\delta}{(\delta + d)^2};$$

$$f_{\text{пит}} = \frac{4 \cdot 0{,}065}{(0.065 + 0{,}12)^2} = 15{,}62,$$

де δ – товщина цегли;

$S$ – відстань між цеглами насадки, м.

Загальний об’єм насадки регенератора, м$^3$:

$$V_{\text{нас}} = \frac{F_{\text{нас}}}{\text{f}_{\text{пит}}},$$

.

За умов зберігання отриманих габаритів регенеративного теплообмінника, розрахуємо його роботу при застосуванні суміші природного та біогазу. Результати розрахунків наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8. Результати розрахунків роботи регенеративного теплообмінника для різного складу палива

| Паливо | $t_{\text{п}}''$, °С | $t'_{\text{пг}}$, °С | Витрата димових газів $B_{\text{г}}$, м$^3$/с | Витрата повітря горіння $B_{\text{п}}$, м$^3$/с | **Кількість теплоти, передана повітрю, кВт/цикл** | Загальна витрата палива, м$^3$/год | Витрата природного газу, м$^3$/год | Витарта біогазу, м$^3$/с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Природний газ | 1000 | 1350 | 2,53 | 2,28 | **2991** | 792 | 792 | - |
| Природний газ+ 10 % біогаз Варіант 1 | 990 | 1338 | 2,42 | 2,19 | **2957** | 792 | 712,8 | 79,2 |
| Природний газ+ 10 % біогаз Варіант 2 | 990 | 1338 | 2,51 | 2,26 | **2991** | 816 | 734,4 | 81,6 |

Для порівняння різних варіантів було обрано величина кількості теплоти, що передається повітрю горіння за цикл роботи регенератора. Для додавання 10 % біогазу ця величина зменшується з 2991 кВт за цикл до 2957

кВт. Тобто для отримання значення 2291 кВт при використанні біогазу необхідно дещо збільшити витрату паливної суміші з 792 до 816 м$^3$/год. Розрахунки показали, що економія природного газу при цьому складе 57,6 м$^3$/год або 1382,4 м$^3$/добу.

# ВИСНОВКИ

Проведено аналіз ефективності застосування біогазу в скловарних печах.

Визначено тепловий баланс скловарної печі, де теплота згорання газу 35070кДж/м$^3$, фізична теплота, що поступає з нагрітим повітрям горіння 13733*В кВт.

Продуктивність печі по скломасі 0,74 кг/с, визначено витрату природного газу 0,22 м$^3$/с.

Визначено кількость біогазу для подачі в піч, результати розрахунків показали, що адіабатна температура горіння при додаванні біогазу газу зменшується з 2560 °С (100 % природного газу) до 2531 °С (суміш 80 % природного та 20 % біогазу).

Теплота згоряння біогазу майже в 2 рази менше, ніж у природного, тому використання його без додавання висококалорійного палива в даному випадку неможливо. У зв’язку з цим пропонується використання біогазу в якості добавки в процесі спалювання природного газу.

Розрахунки роботи регенеративного теплообмінника для різного складу палива дали такі результати , що для додавання 10 % біогазу величина кількості теплоти зменшується з 2991 кВт за цикл до 2957 кВт. Тобто для отримання значення 2291 кВт при використанні біогазу необхідно дещо збільшити витрату паливної суміші з 792 до 816 м$^3$/год. Розрахунки показали, що економія природного газу при цьому складе 57,6 м$^3$/год або 1382,4 м$^3$/добу.

# ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ


1. Е.Д. Гельфанд "Технологія біопалив"
2. https://uabio.org/wp-content/uploads/2021/02/Visio-Ukrainian-Biogas-sector-2021-EN.pdf
3. Науково-технічний центр Біомаса Георгій Гелетуха Петро Кучерук Юрій Матвєєв "Стан розвитку біогазових технологій, рекомендації щодо покращення нормативно-правового поля для їх розвитку в Україні на основі досвіду Німеччини та Європейського Союзу"
4. ДОРОЖНЯ КАРТА РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ ДО 2050 РОКУ Аналітична записка UABIO № 26 Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Матвєєв Ю.Б., Кучерук П.П., Крамар В.Г.
5. "Bioenergy: Biomass to Biofuels" / edited by Anju Dahiya
6. "Bioenergy - Realizing the Potential" / Edited by Semida Silveira
7. "Bioenergy: Principles and Applications" / edited by Yebo Li
8. "Introduction to Bioenergy" / edited by Vaughn C. Nelson
9. "Bioenergy: Biomass to Biofuels" / edited by Anju Dahiya
10. Городів Р.В. Г 70 Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: навчальний посібник / Р.В. Міст, В.Є. Губін, А.С. Матвєєв. - 1-е вид. - Томськ: Вид-во Томського політехнічного університету, 2009. - 294 с.
11. "Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies" - Rafael Luque, Juan Campelo, James Clark
12. Bioenergy : principles and applications / edited by Yebo Li, Samir Kumar Khanal. Description: Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2016.
13. Твайделл Дж., Уейр А. Т26 Відновлювані джерела енергії: Пров. з англ. - М: Енергоатоміздат. 1990. - 392 с.
14. "Glass: Mechanics and Technology" - Eric Le Bourhis // Universite´ de

Poitiers Laboratoire. de Me´tallurgie Physique, UMR 6630 CNRS, SPMI-Te´le´port 2-Bd. Marie et Pierre Curie, BP 30179 86962 Futuroscope-Chasseneuil Cedex Franc

15. "Glass Science and Its Applications" / edited by Ian Donaldson