

УДК 628.47:504.064: 539.3

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-16>

ВНУТРІШНЬОЦИКЛОВА ГАЗИФІКАЦІЯ: ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Маркіна Л. М.,¹ Коваленко Д. В.¹¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, м. Київ

Анотація

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) це перспективна технологія, що дозволяє отримувати енергію з вугілля та інших органічних матеріалів у більш екологічно чистий спосіб порівняно з традиційними методами спалювання. ВЦГ почала розвиватися в середині 20-го століття і з того часу зазнала значних удосконалень. Основні напрямки застосування включають виробництво електроенергії, хімічних продуктів та очищення технологій. Технологія ВЦГ забезпечує високу ефективність перетворення енергії, гнучкість використання синтез-газу та зменшення викидів забруднюючих речовин. Однією з новітніх розробок є метод флеш-газифікації, який дозволяє швидко перетворювати тверді органічні сполуки на синтез-газ з високою ефективністю. ВЦГ має значні перспективи для розвитку, особливо в контексті зменшення викидів парникових газів та переходу до більш сталих джерел енергії. Використання бінарного циклу в комерційних електростанціях дозволяє знизити витрати палива на 50%, що робить цю технологію економічно привабливою.

Ця стаття розглядає основні принципи ВЦГ, її переваги та недоліки, а також перспективи розвитку цього напрямку. Зокрема, аналізуються: Технологічні аспекти ВЦГ – розглядаються різні типи реакторів, умови процесу, а також методи подачі повітря або кисню для підтримки горіння. Вплив властивостей біомаси на ефективність ВЦГ – досліджуються вплив вологості, зольності, хімічного складу біомаси на вихід синтез-газу та його склад. Екологічні аспекти ВЦГ – аналізуються викиди парникових газів, золи та

інших забруднюючих речовин, а також можливі шляхи їх зменшення. Економічна ефективність ВЦГ – розглядаються витрати на будівництво та експлуатацію установок ВЦГ, а також можливі шляхи зниження вартості отриманої енергії. Інтеграція ВЦГ в промисловість знижує залежність від одного джерела енергії, оскільки вона дозволяє використовувати різні види пального, включаючи низькокалорійні джерела.

На основі аналізу переваг та недоліків ВЦГ робиться висновок про те, що цей напрямок має великий потенціал для розвитку, особливо в контексті переходу до зеленої енергетики.

Подальші дослідження та впровадження нових технологій, таких як флеш-газифікація, можуть сприяти підвищенню ефективності та зниженню витрат, забезпечуючи сталий розвиток енергетичної інфраструктури

Ключові слова: внутрішньоциклова газифікація, біомаса, відновлювані джерела енергії, синтез-газ, енергетична ефективність, екологічні аспекти, економічна доцільність.

Abstract

In-cycle gasification (IWG) is a promising technology that allows you to obtain energy from coal and other organic materials in a more environmentally friendly way compared to traditional combustion methods. The VCG began to develop in the middle of the 20th century and has undergone significant improvements since then. Major applications include power generation, chemical products, and purification technologies. VCG technology provides high energy conversion efficiency, flexibility in the use of syngas and reduction of pollutant emissions.

One of the latest developments is the flash gasification method, which allows you to quickly convert solid organic compounds into syngas with high efficiency. The WTC has significant prospects for development, especially in the context of reducing greenhouse gas emissions and transitioning to more sustainable energy sources. The use of the binary cycle in commercial power plants can reduce fuel consumption by 50%, which makes this technology economically attractive. This article discusses the basic principles of VCG, its advantages and disadvantages, as well as the prospects for the development of this direction. In particular, the following are analyzed: Technological aspects of VCG: different types of reactors, process conditions, as well as methods of supplying air or oxygen to support combustion, are considered. Influence of biomass properties on the efficiency of VCG: the influence of moisture, ash content, chemical composition of biomass on the synthesis gas yield and its composition are investigated. Environmental aspects of the WCG: emissions of greenhouse gases, ash and other pollutants are analyzed, as well as possible ways to reduce them. Economic efficiency of VCG: the costs of construction and operation of VCG installations are considered, as well as possible ways to reduce the cost of energy obtained. The integration of VCG into industry reduces dependence on a single energy source, as it allows the use of different types of fuel, including low-calorie sources. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of VCG, it is concluded that this area has great potential for development, especially in the context of the transition to green energy. Further research and implementation of new technologies, such as flash gasification, can contribute to increased efficiency and cost reduction, ensuring the sustainable development of energy infrastructure

Keywords: intra-cycle gasification, biomass, renewable energy sources, synthesis gas, energy efficiency, environmental aspects, economic feasibility.

Вступ

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) є інноваційною технологією, що дозволяє отримувати енергію з вугілля та інших органічних матеріалів у більш екологічно чистий спосіб порівняно

з традиційними методами спалювання. Ця методика почала розвиватися в середині 20-го століття і з того часу зазнала значних удосконалень [1].

ВЦГ-газифікація почала розвиватися в середині 20-го століття, адже була необхідність у нових джерелах енергії через зростаючі потреби.

Методика ВЦГ дозволила отримати енергію з вугілля у більш екологічно чистий спосіб у порівнянні з традиційними методами спалювання. Технологію вдосконалювали на основі досліджень у сфері термохімії і каталітичних процесів.

Значення в енергетичному секторі

- ВЦГ має потенціал стати важливим елементом енергетичної інфраструктури, особливо у країнах, де запаси вугілля великі.
- Виробництво електроенергії: Синтез-газ може бути використаний для генерації електричної енергії в турбінах, що забезпечує стабільну та безперебійну роботу.
- Виробництво хімічних продуктів: З синтез-газу можна отримувати різноманітні хімічні сполуки, такі як метанол та аміак.
- Очисні технології: ВЦГ дозволяє зменшити викиди забруднюючих речовин у атмосферу.

Технологічні переваги

- Ефективність: Завдяки процесам газифікації, вугілля перетворюється на енергію з високим коефіцієнтом корисної дії в порівнянні зі звичайним спалюванням.
- Гнучкість використання: Синтез-газ може бути використаний для різних цілей (енергія, хімія), що підвищує універсальність технології.
- Складна структура: ВЦГ дозволяє інтегрувати різні енергоносії, зменшуючи залежність від одного джерела енергії.

Екологічні переваги

- Зменшення викидів: Внутрішньоциклова газифікація зменшує викиди CO₂, NO_x і SO_x порівняно з традиційними методами спалювання вугілля.
- Вторинне використання вуглецю: Синтез-газ може використовуватися для виробництва чистого водню, який є важливою складовою енергетичної транзитивності до безвуглецевих джерел енергії.

Управління відходами: Процес дозволяє зменшити обсяг відходів, які залишаються після спалювання вугілля, оскільки енергія отримується безпосередньо з газу [1].

В цілому, внутрішньоциклова газифікація вугілля пропонує значні технологічні та екологічні переваги, що робить її важливою для майбутнього енергетичного сектору, особливо в контексті зменшення викидів парникових газів та переходу до більш сталих джерел енергії.

Постановка проблеми

Зростаючий попит на енергію та занепокоєння щодо викидів парникових газів вимагають переходу до відновлюваних джерел енергії.

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ), процес перетворення біомаси та інших відновлюваних ресурсів на синтез-газ, є перспективним напрямком для задоволення цього попиту.

Однак, незважаючи на потенціал ВЦГ, її широке впровадження обмежене рядом проблем. Існуючі технології ВЦГ часто мають низьку ефективність перетворення біомаси на синтез-газ, що призводить до втрат енергії та збільшення витрат. Синтез-газ, отриманий в результаті ВЦГ, часто містить домішки, які ускладнюють його подальше використання для виробництва електроенергії, тепла або синтетичного палива.

Будівництво установок ВЦГ є дорогим, що робить їх недоступними для багатьох потенційних користувачів.

Незважаючи на потенціал ВЦГ, дослідження в цій галузі все ще недостатньо розвинені, що ускладнює оптимізацію процесу та розробку нових технологій.

Тому, для впровадження ВЦГ як ефективного та екологічно чистого джерела енергії, необхідно вирішити низку проблем:

- Збільшення ефективності перетворення біомаси на синтез-газ.
- Оптимізація процесу ВЦГ для отримання синтез-газу з бажаним складом.
- Зниження капітальних витрат на будівництво установок ВЦГ.
- Розроблення нових технологій та удосконалення існуючих для підвищення ефективності та екологічності процесу.

Мета

Стаття має на меті проаналізувати існуючі проблеми ВЦГ та запропонувати можливі шляхи їх вирішення, що сприятиме розвитку цього напрямку для отримання енергії з відновлюваних джерел.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) привертає увагу багатьох вчених, які досліджують її потенціал як ефективного методу отримання енергії з відновлювальних джерел.

Капустянський А.О. провів детальний аналіз процесів ВЦГ, зосереджуючи увагу на оптимізації технологій для підвищення ефективності перетворення біомаси на синтез-газ. Його роботи підкреслюють важливість дослідження складу синтез-газу та його впливу на подальше використання [5].

Запорожець Ю. М. досліджує вплив різних видів сировини на ефективність ВЦГ. Її публікації вказують на те, що вибір сировини може суттєво вплинути на вихід синтез-газу та його якість [6].

Коваленко Т. С. вивчає екологічні аспекти ВЦГ, зокрема, вплив викидів на навколишнє середовище. Її дослідження підкреслюють необхідність розроблення чистих технологій, які можуть зменшити негативний вплив на екологію [7].

Запорожець Ю. М. досліджує впровадження сучасних газотурбінних технологій і комбінованих парогазових установок з використанням вітчизняної техніки, наявних і нетрадиційних паливних ресурсів [8].

Кесова Л. О. досліджує економічні аспекти впровадження ВЦГ в Україні, аналізує капітальні витрати та можливі шляхи зниження витрат на будівництво установок, що робить технологію більш доступною для широкого використання [9].

Гічов Ю. О. досліджує інтеграцію ВЦГ з іншими відновлювальними джерелами енергії, такими як сонячна та вітрова енергія. Його роботи пропонують нові підходи до комбінованого використання різних джерел енергії для підвищення загальної ефективності [10].

Аналіз робіт вчених-дослідників свідчить про те, що внутрішньоциклова газифікація є пер-

спективним напрямком для отримання енергії з відновлювальних джерел. Продовження досліджень у цій галузі допоможе вирішити існуючі проблеми та оптимізувати технології, що, в свою чергу, сприятиме розвитку екологічно чистих джерел енергії.

Виклад основного матеріалу

Наприкінці 20 століття прогресивний розвиток отримала внутрішньоциклова газифікація для електроенергії тобто. використання бінарного циклу, при якому горючий газ газифікації утилізується в газовій турбіні, а продукти згоряння використовуються при генерації пари для парової турбіни. Перша комерційна електростанція із внутрішньоцикловою газифікацією запущена США у Каліфорнії 1983 року фірмою Col Water. В основі проекту використовувався газогенератор Техасо з подачею палива у вигляді водно-вугільної суспензії, потужністю електростанції до 100 мВт або 60 тонн на годину з вугілля. Далі у 90 роках минулого століття у різних країнах було введено в експлуатацію 18 електростанцій із внутрішньоцикловою газифікацією твердого палива потужністю 60–300 мВт кожна. Підвищений інтерес до внутрішньоциклової газифікації у розвинених країнах викликаний двома факторами: екологічними – при використанні генераторного газу скорочуються викиди оксидів сірки, азотистих сполук та твердих частинок в атмосферу. Друге, економічне – використання бінарного циклу дозволяє збільшити ККД із зменшенням витрати палива на 50% для отримання тієї самої кількості електроенергії. Цілком закономірно, що динаміка використання внутрішньоциклової газифікації збільшуватиметься.

Низька, щодо вартості капітального ремонту, вартість вітчизняного обладнання дасть можливість реконструкції старих потужностей та впровадження нових виробників, що генерують. Технологія буде ще більш привабливою за наявності екологічних обмежень у місцях розміщення через скорочення у 30 разів викидів в атмосферу щодо спалювання вугілля безпосередньо. Також привабливим для потенційних інвесторів буде використання низькокалорійних джерел твердого палива, які користуються малим попитом і не затребувані – буре вугілля, торф, відновлювані

джерела енергії, рослинництва тощо. Надалі буде використано ресурс ТПВ (тверді побутові відходи), які на сьогодні складають близько 20–30 кг на людину щодобово [3].

Класифікація технологій газифікації

Для сучасної хімічної промисловості та енергетики потрібні газогенератори з одиничною потужністю вугілля 100 т на годину і більше. В основному в промисловій практиці використовують газогенератори Вінклера в киплячому шарі, шарові генератори Лурги з одиничною потужністю по вугіллю 45 т на годину, пилокутні генератори Коперса-Тотцека. Аналіз конструктивних особливостей та принципів роботи сучасних промислових газогенераторів (їх модифікацій понад 10) можна виділити 3 основні конструкції [5].

1. Розробка Фріца Вінклера (концерн BASF) у 1926 р. Газогенератор киплячого шару. Ця технологія стала стимулом для сучасних процесів НТВ (Hoch – Temperatur Winkler) та КRW (Kellogg-Rus-Westinghouse) та ін.

2. Розробка фірми Лурги в 1932 р. шарового газогенератора.

3. Розробка Генріхом Коперсом і Фрідріхом Тотцеком в 1944 р., установка з газифікації вугільного пилу, що працює під тиском 3 мПа і більше. Використання підвищеного тиску для інтенсифікації процесу газифікації реалізовано майже у всіх промислових світових газогенераторах, наприклад, у Китаї газифікатори подібного типу мають робочий тиск до 5.0 мПа. Основний газифікуючий реагент – буре вугілля з рідким шлаковидаленням. Технологія слугувала основою для сучасних процесів газифікації з рідким видаленням золота, реалізованим в апаратах Dectec Shell Prenflo, всі вони розроблені на основі газогенератора Коперса-Тотцека [9].

Були спроби використовувати в газогенераторах зовнішні теплоносії, у тому числі ядерне паливо, газифікацію в розплавах солей, двох щаблів у плазмі тощо.

У сучасності в багатьох країнах, практичне застосування технології газифікації впроваджене у вигляді IGCC (інтегрованої комбінований цикл газифікації – ІКЦГ) – це технологія, яка використовує газогенератор, щоб перетворити вугілля та інші види палива (рис. 1), див. таблицю 1.

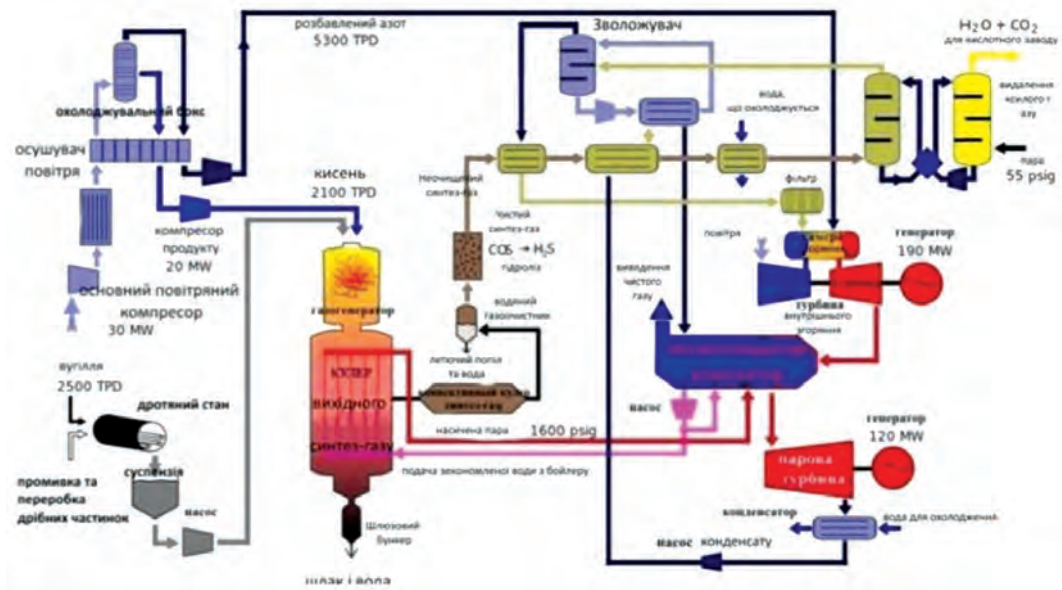


Рисунок 1. Принципова технологічна схема комбінованого циклу комплексної газифікації

Оцінка екологічних та економічних переваг внутрішньоциклової газифікації

Таблиця 1

Порівняльна характеристика технологій газифікації IGCC

Система IGCC	Опис	Основне паливне джерело	Ефективність	Екологічний вплив	Переваги	Недоліки
Стандартна IGCC	Поєднує вугілля з газовою та паровою турбіною	Вугілля	40-45%	Зниження викидів CO ₂ з можливістю уловлення	Висока енерго-ефективність	Висока вартість будівництва та експлуатації
Система IGCC з уловленням вуглецю (CCS)	Інтегрує технології газифікації з системами для уловлення вуглецю	Вугілля, біомаса	50-60% з CCS	Дуже низькі викиди CO ₂	Значне зменшення викидів	Додаткові витрати на уловлення та зберігання
IGCC на основі біомаси	Використовує біомасу як основне паливо	Біомаса	30-40%	Зниження викидів CO ₂ може бути вуглецево-нейтральним	Спрощує утилізацію відходів	Залежність від сезонних поставок біомаси
Система IGCC з палива	Може працювати з різними видами пального (вугілля, газ)	Вугілля або природний газ	45-50%	Зниження викидів в порівнянні з традиційними технологіями	Гнучкість в використанні видів пального	Потребує адаптації обладнання
Модернізовані IGCC	Включає нові технології для підвищення виробництва енергії	Вугілля, різні види пального	50% і вище	Додаткові знижки на викиди	Висока надійність та стабільність роботи	Необхідність постійного вдосконалення технологій

Екологічні переваги (таблиця 2):

1. Зменшення викидів забруднюючих речовин: Внутрішньоциклова газифікація вугілля дозволяє значно зменшити викиди CO₂, NO_x і SO_x у порівнянні з традиційним спалюванням вугілля. Виробництво синтетичного газу (синтез-газу) забезпечує менше забруднення навколишнього середовища.

2. Система очищення газу: Технології газифікації можуть бути інтегровані з системами очищення, такими як уловлення та зберігання вуглецю (CCS), що дозволяє утримувати вуглекислий газ перед його потраплянням в атмосферу.

3. Утилізація відходів: Процес газифікації може ефективно використовувати низькокалорійне вугілля або вугілля низької якості, що зазвичай не підходить для спалювання.

Економічні переваги:

1. Ефективність енергетичного виробництва: Завдяки високій ефективності конверсії (понад 80%) внутрішньоциклова газифікація може знизити витрати на електричну енергію та збільшити рентабельність проєктів.

2. Гнучкість у використанні пального: Системи газифікації можуть працювати з різними видами пального (вугілля, біомаса), що розширює можливості постачання та знижує цінові ризики.

3. Стимули для інвестицій: Інвестування в нові технології, такі як внутрішньоциклова га-

зифікація, може привести до отримання державних дотацій і знижок, полегшуючи фінансування [11, 12].

Розглянемо окремо продукт, отриманий в процесі газифікації, який має багато потенціалу для використання як альтернативного палива - генераторний газ.

Генераторний газ – це суміш різних газів, які утворюються під час газифікації. Його склад залежить від типу сировини, умов газифікації та технології, що використовується.

Типовий склад генераторного газу [14]:

- Монооксид вуглецю (CO): Зазвичай становить 20-30% від загального об'єму газу. Це горючий газ, який є основним джерелом енергії в генераторному газі.

- Водень (H₂): Зазвичай становить 15–25% від загального об'єму газу. Це також горючий газ, який додає теплову цінність генераторному газу.

- Вуглекислий газ (CO₂): Зазвичай становить 10-20% від загального об'єму газу. Це негорючий газ, який знижує теплову цінність генераторного газу.

- Метан (CH₄): Зазвичай становить 1–5% від загального об'єму газу. Це горючий газ, який додає теплову цінність генераторному газу.

- Азот (N₂): Зазвичай становить 5–15% від загального об'єму газу. Це негорючий газ, який не впливає на теплову цінність генераторного газу.

Таблиця 2

Порівняння екологічних та економічних показників внутрішньоциклова газифікації з традиційним спалюванням вугілля

Показник	Внутрішньоциклова газифікація	Традиційне спалювання вугілля
Екологічні викиди CO ₂	Знижені викиди завдяки очищенню	Високі викиди CO ₂
Викиди NO _x і SO _x	Низькі викиди, можливість очищення	Високі викиди
Ефективність перетворення	Більш ніж 80%	Зазвичай 30-40%
Використання вторинних пального	Можливість використання різних видів	Обмежене використання пального
Вартість електрики	Може бути нижчою завдяки ефективності	Зазвичай вища через високі витрати
Системи очищення	Інтегровані системи очищення	Часто не існують або є недостатніми

Використання генераторного газу:

- Генераторний газ може використовуватися в різних сферах:
 - Електроенергетика: Генераторний газ може використовуватися для виробництва електроенергії в газових турбінах або двигунах внутрішнього згоряння.
 - Опалення: Генераторний газ може використовуватися для опалення будівель, промислових об'єктів та інших споруд.
 - Транспорт: Генераторний газ може використовуватися як паливо для двигунів внутрішнього згоряння в транспортних засобах.
 - Хімічна промисловість: Генераторний газ може використовуватися як сировина для виробництва аміаку, метанолу та інших хімічних продуктів.

Переваги використання генераторного газу:

- Відновлюване джерело енергії: Генераторний газ може бути отриманий з відновлюваних джерел, таких як біомаса, що сприяє зменшенню викидів парникових газів.
- Зниження залежності від викопних палив: Використання генераторного газу може зменшити залежність від викопних палив, таких як вугілля та нафта.
- Зменшення викидів забруднюючих речовин: При правильному використанні генераторний газ може призвести до значного зменшення викидів забруднюючих речовин, таких як оксиди сірки та азоту.

Недоліки використання генераторного газу:

- Низька теплова цінність: Генераторний газ має нижчу теплову цінність, ніж природний газ, що може вимагати більших обсягів для отримання тієї ж кількості енергії.
- Високі витрати на виробництво: Виробництво генераторного газу може бути дорожчим, ніж виробництво природного газу.

Генераторний газ має великий потенціал для розвитку, особливо в контексті переходу до відновлюваних джерел енергії. Проте, для широкого використання генераторного газу необхідні подальші дослідження та розробки, зокрема в галузі:

Зниження вартості виробництва: Потрібні більш ефективні та економічно вигідні технології газифікації.

Покращення ефективності використання: Потрібні більш ефективні двигуни та системи спалювання, які можуть використовувати генераторний газ.

Зменшення викидів забруднюючих речовин: Потрібні більш ефективні технології очищення генераторного газу [8].

Дослідження сучасних розробок

У період із 2014–2017рр. українським інженером Володимиром Коваленком за фінансової підтримки китайського інвестора Вана Сяо Фена та участі доктора економічних наук Дмитра Кривошеєва було розроблено та патентовано метод Флеш газифікації (швидкісний) твердих органічних сполук. За основу взято практично всі конструкції газифікаторів, враховано всі їхні недоліки, на основі теоретичних досліджень було зроблено пілотний зразок, потім прототип майбутніх газифікаторів. Метод запатентований в патентному бюро КНР як корисна модель, а потім, як винахід і готовий до впровадження [4].

Пілотні зразки газифікаторів пройшли перевірку. За сировину було взято буре вугілля кількох родовищ Китаю і на базі пілотних зразків побудовано установку-прототип продуктивністю до 300 м³ на годину по синтезу газу.

Короткі характеристики: час запуску 3 хвилин до виходу на проектну потужність. Так, з 1 т бурого вугілля вихід по газу до 5000 м³ енергетичного газу при зольності вугілля 10% та вологості 30%, температура газу на виході з газогенератора порядку +67°C, видалення золи сухе, метод газифікації кулястий, температура в реакційній зоні 450–680°C, газифікуючий паровий реагент, повітряний, з кисневою стабілізацією, Склад газу на замовлення споживача: низькокалорійний або середньої калорійності. Склад середньо калорійного газу 3200 ккал м³: Н₂ до 48%, ЗІ до 60% у регульованій пропорції.

У залишку СО₂ до 4%, можлива присутність метану. У режимі виробництва технологічного газу азот у складі відсутня. Продуктивність газогенератора до 24000 м³ за годину одного модуля. Співвідношення пари: вуглець (Н₂О:С), Макс 1:1, ступінь конверсії 99%, фракційний склад бурого вугілля, діаметром 0,1-30 мм.

Вологість не регламентується до 45%, енергетичні витрати на 1000 м³ синтез газу 10–15 кВт за годину.

Питомі капітальні витрати на 1 м³ газу (0,3 кВт теплової енергії) близько 50 USD проти 1500 USD методом Лурги, є тенденції до зниження капітальних витрат до 25 USD.

Порівняльний аналіз методів наведено у таблиці 3.

Максимальний вихід синтезу середньокалорійного газу на 1 т. антрациту становить 9600 м³ при конверсії вуглецю 99,8%.

Габаритні розміри модуля: діаметр 400–1500 мм. Висота 1000–4500 мм. Продуктивність блоку (в хв.) 12 м³ – макс 24000 м³ год, встановлена електрична потужність 0.125–20 кВт [10]. Технологічне обладнання маломатеріаломістке, конструкція комплексу модульна, високотехнологічна.

Примітно, що для стабілізації процесу газогенератора необхідно до 2–5 м³ кисню на годину. Кисень використовувався 95% з установки концентратора кисню ПСА. Процес автоматизований за трьома параметрами температурної,

Таблиця 3

Порівняльний аналіз технологій газифікації

Показник	Метод Лурги	Метод Вінклер	Метод Копперс-Тотцек	Метод Коваленко
Продуктивність генератора				
по сухому вуглю, т/ч	40-75	20-35	до 40	10
по сухому газу м ³ / год	75000	60000	50000	24000-56000
Коефіцієнт використання вуглеводню, %	90	85	89	98
ККД газифікації, %	75-85	65-85	65-85	95-98
Температура, °С				
у зоні реакції	750-1100	820-1100	1300-1700	580-680
газу на виході	260-430	900-950	1100-1200	67-88
Час перебування палива в газогенераторі,	≈5000	100-500	≈1	3
Витрата				
вугілля, кг на 1000 м ³ сухого газу	800-650	750-610	660-560	200
кисню, м ³ на 1000 м ³ (СО+Н ₂)	210-250	300-350	400-500	1,8-2,5
Вихід сухого газу, м ³ на 1т вугілля	1200-1500	1350-1650 р	1500-1800	2400-3600
Теплота згоряння газу, кДж/м ³	11900-16300	7500-9400	10300-11700	13200-17100
Склад сухого газу, % (V)				
СО ₂ + Н ₂ С	25-31	17-22	10-18	5-6,5+0,001
СО	17-25	31-35	50-60	43-65
Н ₂	40-42	32-43	29-34	38-51
СН ₄	9-10	0,5-1	0,1	2-2,9
Н ₂	0,5-1	1-19	1-2	0

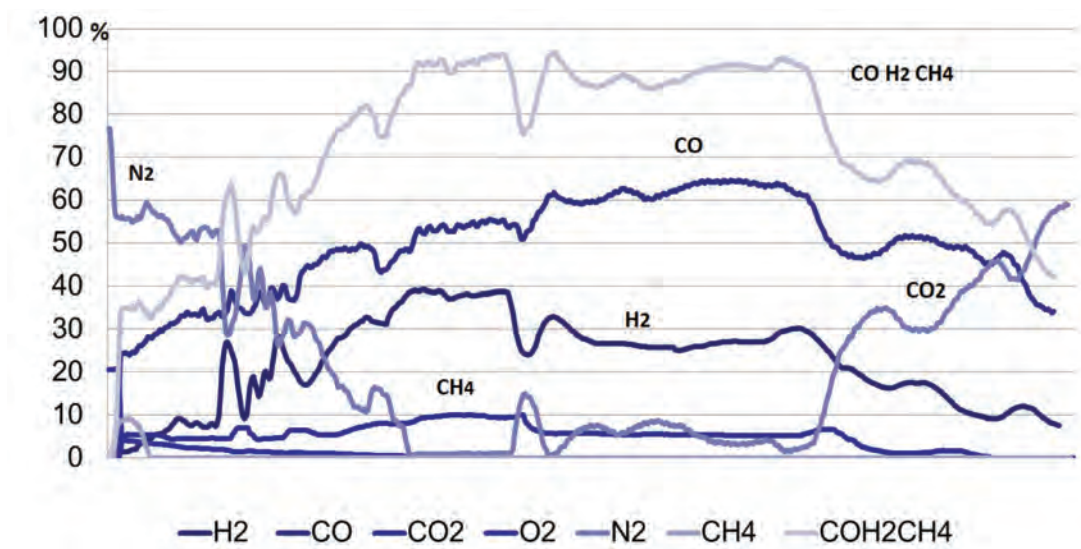


Рисунок 2. Графік роботи флеш газогенератора з інтервалом вимірювання 10 с (час роботи – 3 години) [4]

в діапазоні температур 320–580°C, газової за якістю вихідного газу та тиску на виході комплексу первинне, 0,28 Бар.

Сировиною для газогенератора може бути будь-яка органічна сировина всiяке вугiлля, торф, деревина, відходи сiльськогосподарського виробництва, ТПВ (твердi побутовi відходи) тощо.

Для газифікації цих видів сировини необхідна корекція газогенератора на кшталт сировини, одного чи іншого виду.

Особливості генераторів подібного типу, це конструктивно вбудований паровий генератор, що забезпечує себе паром і одночасно стабілізатор температурного режиму всередині газогенератора.

Незалежно від вмісту сірки у складі вуглеводневої сировини газової складової всього 0,012 ppm. З метою скорочення витрат, дисперсна волога з сировини виводиться, уловлюється методом конденсації, очищається і направляється в парогенератор для повторного використання як газифікуючого агента.

Газифікація є основним постачальником синтез-газу нафтохімічної промисловості, для виробництва хімічних добрив, для виробництва водню, органічного синтезу альтернативних видів енергії, диметилвий ефір. Утилізація побутових відходів тощо. Утилізація пластику, відходів сiльськогосподарського виробництва Енергетич-

ний газ газогенератора може бути використаний при виробництві металів у металургії.

Так, у сiльському господарствi найенергоємнiший процес – сушіння зернових, з впровадженням флеш-газифікації, ця проблема вирішується, оскільки сировиною є відходи рослинництва солома, стебла кукурудзи, соняшнику та інших культур.

Найбільш затребуваним напрямком газифікації може бути виробництво електроенергії та виробництво рідких енергоносіїв.

Співвідношення $H_2O:C$ (пара: вуглець) 1:1 для Флеш газифікації.

Графік роботи флеш газогенератора з інтервалом вимірювання 10 с і зміною параметрів налаштування, зміни видно на провалах експоненти. При збільшенні Азотного параметра пропорційно падають усі параметри газифікації, це дієвим методом управління всього процесу (рис. 2).

Робота газоаналізатора в режимі онлайн вимірів у процесі газифікації, всі параметри вимірів у відсотковому обчисленні.

Для газифікації органічних сполук рослинного походження реактор вводиться ступінь тарифікації, а потім включається режим газифікації.

Основна перевага методу технологічність, відсутність витрат на підготовку сировини під газифікацію, сушіння лише подрібнення до потрібної фракції 1–30 мм, мікс. Вологість сировини не регламентується (рис. 3) [4].



Рисунок 3. Робота газифікатора та газоаналізатора в режимі онлайн вимірів у процесі газифікації [4]

Визначення потенціалу ВЦГ. Інтеграція нових технологій у промисловість та 4енергетичний сектор [13]

Використання у відновлювальних джерелах енергії:

- Флеш-газифікація може бути інтегрована у системи відновлювальної енергетики для перетворення біомаси та відходів в енергію, що допомагає зменшити залежність від викопних джерел енергії.

Синтез-газ як інгредієнт:

- Синтетичний газ може бути використаний у виробництві хімічних сполук, таких як метанол чи аміак. Це дозволяє розширювати можливості використання газу, з огляду на поточні потреби промисловості.

Зменшення відходів:

- Завдяки флеш-газифікації відходи можуть бути використані як сировина для енергетики, що дозволяє зменшити обсяг відходів на звалищах і виклики, пов'язані з їх утилізацією.

Підтримка сталого розвитку:

- Інтеграція флеш-газифікації у промислові процеси та енергетичні системи може сприяти переходу до більш сталих практик, знижуючи вуглецевий слід і забезпечуючи чистіші технології енергетичної генерації.

Економічні перспективи:

- Впровадження нових технологій може призвести до створення нових робочих місць у сферах досліджень, розробок.

Висновки

Внутрішньоциклова газифікація (ВЦГ) має значні перспективи та переваги в енергетичному секторі. Основні з них включають високу ефективність перетворення енергії з ККД понад 80%, значне зменшення викидів CO₂, NO_x, і SO_x в атмосферу, а також гнучкість у використанні синтез-газу для різних цілей, таких як виробництво електричної енергії та хімічних продуктів. Використання бінарного циклу в комерційних електростанціях знижує витрати палива на 50%, що робить цю технологію економічно вигідною. Інтеграція ВЦГ в промисловість знижує залежність від одного джерела енергії, оскільки вона дозволяє використовувати різні види пального, включаючи низькокалорійні джерела.

В результаті дослідження визначені основні переваги та перспективи масштабного впровадження ВЦГ світовій енергетичній інфраструктурі.

Екологічність: Внутрішньоциклова газифікація вугілля демонструє значні екологічні переваги порівняно з традиційними методами спалювання, включаючи зниження викидів оксидів сірки, азоту та часток твердих речовин. Завдяки використанню генераторного газу, ця технологія забезпечує екологічно чистіше рішення для виробництва електроенергії.

Підвищення конкурентоспроможності: Завдяки новим технологіям газифікація може стати конкурентоспроможною в порівнянні з традиційними видами палива.

Технологічні інновації: Один із ключових аспектів розвитку газифікації – це інтеграція новітніх технологій, таких як флеш-газифікація. Ці інновації відкривають нові горизонти для використання альтернативних джерел сировини, включаючи буре вугілля, торф, відходи сільського господарства та побутові відходи.

Перспективи розвитку: Урахування зростаючих потреб у зниженні викидів та підвищенні енергоефективності створює сприятливі умови для розширення використання внутрішньоциклової газифікації. Реконструкція існуючих електростанцій та впровадження нових технологій газифікації можуть стати важливими кроками для підвищення енергетичної незалежності та стійкості.

Інтеграція у відновлювану енергетику: Газифікація може стати частиною комплексних рішень у галузі відновлюваної енергетики, особливо у зв'язку з розвитком технологій зберігання енергії.

Необхідність подальших досліджень: Слід підкреслити важливість продовження досліджень у галузі технологій газифікації для освоєння нових сировинних матеріалів, покращення конструкцій газифікаторів та оптимізації процесів. Це сприятиме досягненню максимального виходу синтез-газу та підвищення ефективності всієї системи енергетичного забезпечення.

Список використаних джерел

1. Дубровський В.І. (2016). Газифікація вугілля: технології та екологічні аспекти. *Енергетика та екологія*, 45(2), 123-130.
2. Chakraborty A., & Parikh J. (2018). Review on gasification technologies and the role of gasifiers in the conversion of solid fuels into gaseous fuels. *International Journal of Energy Research*, 42(5), 1577-1593. [doi:10.1002/er.3823](https://doi.org/10.1002/er.3823)
3. Manousiouthakis V., & Kotsalos A. (2019). Advanced technologies for coal gasification: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, 183, 81-96. [doi:10.1016/j.enconman.2019.01.029](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.029)
4. Kovalenko V. (2017). Флеш-газифікація: нові підходи у перетворенні твердих органічних матеріалів. *Наука та технології*, 2(4), 142-147.
5. Капустянський А.О. (2016) Аналіз діяльності паливно-енергетичного комплексу України / А. О. Капустянський, Г.Б. Варламов // *Вісник ТНТУ*, Т. : ТНТУ, Том 83. № 3. С. 144-153. — (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).
6. Запорожець Ю.М. «Теплові електростанції України перед дилемою: або закриття, або інтенсивне відновлення». *Наукові праці. Серія: Техногенна безпека* 210.198 (2013).
7. Лис С.С., Юрасова О.Г., Коваленко Т.П.. Розроблення способу газифікації подрібненого вугілля. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2021, т. 31, № 1
8. Кєсова Л.О. Оцінка ефективності впровадження парогазових і ЦКШ-технологій на ТЕС України / Л. О. Кєсова, В. С. Коберник, І. С. Соколовська // *Проблеми загальної енергетики*. - 2018. - Вип. 3. - С. 42-47.
9. Duan P., Wang Y., & Liu J. (2015). Review on the progress of coal gasification technology. *Fuel Processing Technology*, 133, 63-74. [doi:10.1016/j.fuproc.2015.01.004](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.004)
10. Гічов Ю. (2011). Проблеми теорії і технології перетворення і використання енергії. *Дніпропетровськ НМетАУ*.
11. Zhang Z., Wang X., & Liu Y. (2020). The development and application of integrated gasification combined cycle technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109925. [doi:10.1016/j.rser.2020.109925](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109925)
12. Barton P.I., & Reay D. A. (2017). A review of the gasification of biomass: The socio-economic and environmental issues. *Energy Reports*, 3, 353-374. [doi:10.1016/j.egy.2017.03.002](https://doi.org/10.1016/j.egy.2017.03.002)
13. Röder D., & Mohr M. (2018). Technological advancements in gasification for the production of hydrogen from coal and biomass. *Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4096-4109. [doi:10.1016/j.ijhydene.2018.01.179](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.179)
14. Sarvaš J. (2018). The potential of biomass gasification to generate renewable energy: A state-of-the-art review. *Renewable Energy*, 129, 565-578. [doi:10.1016/j.renene.2018.02.097](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.097)
15. *Energy & Fuels*. Видані статті з 1987 року. *Energy & Fuels* Bennett, James P. «Slag Management of Carbon Feedstock Used in Gasification FY17 TCF between Eastman Chemical and NETL (Final Report)», Jan. 2020. <https://doi.org/10.2172/1643442>

Екологічна безпека та технології захисту довкілля

Вул. Вознесенський узвіз 10а,
прим. 602. м. Київ, 04055

Тел: +380980625787
(контактна особа-Печений Володимир)

Corporation_office@ukr.net
<https://ecocorptzd.com.ua>
<https://facebook.com/SIAS.Techecosafety/>