

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 546.26:542.71-021.58(048.83)

ПАНОВ С. М., д.т.н., проф.; КАРВАЦЬКИЙ А. Я., д.т.н., проф., с.н.с.; ЛЕЛЕКА С. В., к.т.н.;
МІКУЛЬОНОК І. О., д.т.н., проф., с.н.с.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ОТРИМАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЮ. ЧАСТИНА 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ТА ЙОГО ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Проаналізовано доцільність, особливості й перспективи процесу газифікації твердого й рідкого палива з метою зниження витрати природного газу в енергетичній та інших енергоємних галузях промисловості, а також зниження шкідливого впливу на довкілля за рахунок застосування синтез-газу, одержуваного в результаті газифікації. Незважаючи на значний світовий досвід у галузі термічного перероблення палива на горючий газ, питання розроблення високоефективних технологій одержання і використання синтез-газу на основі реакції газифікації вуглецю залишається вкрай актуальним завданням.

Ключові слова: вуглець, паливо, газифікація, синтез-газ.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2020.207801

© Панов С. М., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Мікульонок І. О., 2020

Постановка проблеми. Значні коливання цін на природний газ спричинюють перехід енергетики та енергоємних галузей промисловості на збільшення використання твердого палива з попередньою його газифікацією, тобто беззалишкове перетворення органічної частини твердого або рідкого палива на горючий газ шляхом його взаємодії за високої температури (1000–2000 °С) з повітрям, водяною парою, технічним киснем і діоксидом вуглецю, а також їхніми сумішами [1–3]. Процес газифікації здійснюють у газогенераторах, тому отриманий газ називають генераторним.

Незважаючи на значний досвід у галузі термічного перероблення твердого або рідкого палива на горючий газ, питання розроблення високоефективних технологій одержання генераторних газів залишається нагальною проблемою. Тому аналіз сучасного стану проблеми отримання і використання синтез-газу (водяного газу, генераторного газу, сингазу) на основі реакції газифікації вуглецю є актуальним завданням для розроблення енергоефективних та екобезпечних технологій переробки вихідного палива.

Метою статті є аналіз процесу газифікації твердого палива і біомаси та його практичне застосування в енергетичній та інших галузях промисловості для зменшення споживання природного газу та шкідливих викидів у довкілля.

Аналіз попередніх досліджень

Загальні питання процесу газифікації твердого й рідкого палива

Дослідженню процесів газифікації присвячено значну кількість наукових праць [4–26].

Сировиною для процесу газифікації палива зазвичай є кам'яне і буре вугілля, горючі сланці, торф, деревина, мазут, гудрон тощо. Під час газифікації твердих горючих копалин проходить сукупність процесів, що включає піроліз – неповне згоряння і конверсію – повне окиснення. Типові хімічні реакції, які мають місце під час газифікації, наведено в табл. 1.

Залежно від розмірів частинок і агрегатного стану сировини процес її газифікації може відбуватися декількома способами: кускової сировини – у щільному шарі, дрібнозернистої – в «киплячому» (псевдозрідженому) шарі, пилоподібної й рідкої – у факелі. Під час газифікації твердого палива в газову фазу

переходить до 80 % органічної частини палива. Через нечутливість до якості сировини й наявності баласту (мінеральних домішок та вологи) метод знаходить широке застосування для переробки низькосортних видів палива. Крім того, отримане газоподібне паливо в разі спалювання виділяє значно меншу кількість шкідливих речовин, ніж під час прямого спалювання твердого палива.

Таблиця 1 – Типові реакції, що проходять під час газифікації [2]

Тип реакції	Реакція
Реакції з вуглецем	
1 реакція Будуара	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO - 172 \text{ кДж/моль}$
2 водяний газ	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 - 131 \text{ кДж/моль}$
3 гідрогазифікація	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 + 74,8 \text{ кДж/моль}$
	$C + 0,5O_2 \rightarrow CO + 111 \text{ кДж/моль}$
Реакції окиснення	
4	$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 394 \text{ кДж/моль}$
5	$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2 + 284 \text{ кДж/моль}$
6	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O + 803 \text{ кДж/моль}$
7	$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow HO_2 + 242 \text{ кДж/моль}$
Реакція заміщення	
8	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 + 41,2 \text{ кДж/моль}$
Реакції утворення метану	
9	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 + 247 \text{ кДж/моль}$
10	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O + 206 \text{ кДж/моль}$
11	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + 165 \text{ кДж/моль}$
Реакції розкладу метану з відновленням водню	
12	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 - 206 \text{ кДж/моль}$

Газифікація нафтової сировини, важких нафтових залишків проводиться за температури (1400–1500) °С, атмосферному або підвищеному (4–8) МПа тиску в присутності окисника – повітря, іноді із застосуванням каталізаторів (боксити, кислі глини, нікель, кобальт).

Залежно від застосовуваного дуття отримують різні види газоподібного палива: синтез-газ, водяний газ, повітряний газ, змішаний газ.

Одержані в процесі газифікації генераторні гази використовуються як паливо, а після його очищення від H_2S , CS_2 , CO_2 – як джерело водню у виробництві аміаку, суміш реагентів у виробництві метанолу та рідких вуглеводнів (синтез Fischer–Tropsch) тощо.

Сучасні газогенератори мають потужність за твердим паливом до 80000 м³/год. Техніка газифікації розвивається в напрямку підвищення продуктивності до 200000 м³/год і ККД до 90 % за рахунок підвищення температури й тиску процесу до 2000 °С і 10 МПа, відповідно.

Склад утворюваного під час газифікації газу залежить від характеру сировини, методу та умов газифікації і тому може істотно різнитися.

Спалювання газоподібного палива має низку суттєвих теплотехнічних переваг перед спалюванням твердого палива. Завдяки тому, що газоподібне паливо може бути добре змішане з повітрям, для досягнення повноти згоряння не має потреби у великих значеннях надлишку повітря і газ можна спалювати майже за теоретичної витрати повітря, внаслідок чого досягається висока температура горіння. Для подальшого підвищення температури горіння можуть бути підігріті як повітря, так і газ, тоді як у разі спалювання твердого палива може бути підігріте лише повітря.

До основних переваг спалювання продуктів газифікації порівняно із спалюванням твердого палива належать:

- нижча емісія речовин, що забруднюють атмосферу;
- продукти газифікації, крім виробництва електроенергії або теплоти, можна використовувати як

сировину для синтезу хімічних продуктів;

- синтез-газ, на відміну від твердого палива, може бути додатково очищений від небажаних складових;
- під час спалювання синтез-газу експлуатаційні показники котлів та топків підвищуються;
- можливість використання в широкому спектрі енергогенеруючого обладнання.

Синтез-газ – це газова суміш, яка містить різну кількість монооксиду вуглецю (CO), водню (H₂) і метану (CH₄), а також малу кількість діоксиду вуглецю (CO₂). Також можливе утворення незначної кількості сірководню (H₂S) та вищих вуглеводнів (C_mH_n).

Процеси газифікації класифікуються за такими ознаками:

- теплою згоряння отримуваних газів: низькою (3–7) МДж/м³, середньою (7–16) МДж/м³ і високою (20–40) МДж/м³;
- призначенням газів: енергетичного (безпосереднього спалювання) і технологічного (хімічний синтез, виробництво водню, технічного вуглецю);

– розміром частинок твердого палива: газифікація крупнозернистих, дрібнозернистих і пиловидних палив;

– типом дуття: повітряне, пароповітряне, кисневе, паро-кисневе, парове;

– характером руху газифікованого палива: щільного шару, киплячого шару, потоку та розплаву;

– способом видалення мінеральних домішок: мокре та сухе золовидалення, рідке шлаковидалення;

– тиском газифікації: за атмосферного (0,1–0,13) МПа, середнього (до (2–3) МПа) і високого (вище (2–3) МПа);

– температурою газифікації: низькотемпературна (до 800 °С), середньотемпературна (800–1300 °С) і високотемпературна (понад 1300 °С);

– балансом теплоти в процесі газифікації: автотермічний (стабільна температура підтримується за рахунок внутрішніх джерел теплоти в системі) і аллотермічний, тобто потребують підводу теплоти із зовні для підтримки процесу газифікації. Зовнішнє підведення теплоти здійснюється за допомогою твердих, рідких і газоподібних теплоносіїв або електричної енергії;

– періодичністю дії: періодичної дії (процес ступінчастий, спочатку паливо продувається повітрям для отримання необхідної теплоти, а потім вводять газифікувальний агент) та безперервної дії.

Конструкції та принципи роботи газифікаційного обладнання

Перехід великої енергетики та деяких галузей промисловості на збільшення використання твердого палива з попередньою його газифікацією зумовило появу великої кількості розробок реакторного обладнання та досліджень процесів газифікації твердого палива і біомаси [1–38].

Залежно від характеру взаємодії твердого палива з дуттям промислові газогенератори поділяють на три типи: газифікатори в потоці, з нерухомим або рухомим шаром [1, 2], а також з псевдозрідженим шаром (рис. 1).



Рис. 1 – Технології і типи газифікаторів для комерційного використання [1]

Інтенсивність процесів у газогенераторі оцінюється питомою витратою газифікованого палива, тобто його витратою на одиницю площі апарату за одиницю часу (рис. 2). Найвищу потужність мають газогенератори з газифікацією в потоці.

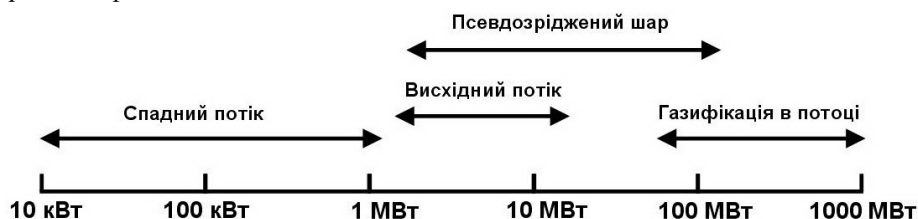


Рис. 2 – Теплова потужність різних типів газогенераторів [1]

Склад синтез-газу залежить від способу його отримання (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняння складу синтез-газу залежно від способу його отримання, % (за об.)

Спосіб отримання газу в газифікаторі	H ₂	CO	CH ₄ та ін. вуглеводні	CO ₂
Lurgi	39	20	11	30
Koppers-Totzek	29	56	< 0,1	12
Winkler	39	35	1,8	22
Піролізний синтез-газ	16–22	15–22	1–2,5	11–15

У статтях [27, 28] розглянуто киснево-повітряний газифікатор із захопленим потоком вугілля Korea Institute of Energy Research (KIER). Водно-вугільна суспензія під час газифікації впорскується в газогенератор KIER крізь центральний отвір пальника, а кисень вдувається крізь вісім розташованих навколо нього отворів, при цьому кут впорскування вторинного потоку кисню становить 15°. Тому, як тільки суспензія надходить у газогенератор, вона піддається дії високошвидкісного вторинного потоку кисню і диспергується на краплі різного розміру.

Двоступінчастий газифікатор із захопленим потоком з опозитною подачею наведено у праці [29]. Вугільна суспензія і кисень вводяться в два бічні входи першого ступеня. Перший ступінь завдяки спалюванню вугілля забезпечує гарячими газами другий ступінь газифікатора, в який вводиться лише вугільна суспензія. Більшість процесів газифікації вугілля проходить на другій стадії.

У статті [30] для розробки комплексного циклу газифікації вугілля (Integrated Coal Gasification Combined Cycle (IGCC)) для електростанцій потужністю 250 МВт використано дослідний зразок газифікатора потужністю 2 т/добу, що був розроблений Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI). Газифікатор складається з двох камер – камери згоряння та редуктора (відновника). Вугілля та напівкокс окиснюються вторинним повітрям, а зола відводиться у вигляді розплавленого шлаку. У відновнику газ, що надходить з камери згоряння, змішується з порошкоподібним вугіллям, що сприяє виходу летких та реакцій газифікації. Неспалене вугілля на виході з газифікатора збирається сепаратором циклонного типу і повертається до камери згоряння.

Новий тип поетапного газифікатора вугільної суспензії наведено у праці [31]. Суміш O₂ і CO₂ разом з вугільною суспензією вводиться в топку з верхньої частини газифікатора. Коли високотемпературні гази потрапляють у струмінь, через інтенсивні реакції між O₂ та реагентами виникає полум'я. Оскільки лише 85 % загального живлення O₂ подається через верхній струмінь, то співвідношення кисень/вугілля в основному потоці є низьким, а температура у верхній частині газифікатора обмежена. На другому етапі вводиться вторинний окисник для підвищення температури в нижній області газифікатора. Додатковий потік струменя змінює поле обмеженого потоку струменя і посилює бурхливе змішування в поетапному газифікаторі.

У статті [32] розглянуто типовий подвійний газифікатор з псевдозрідженим шаром для газифікації біомаси, що включає два окремі реактори: газифікатор і камеру згоряння. У газифікаторі біомаса для генерування синтез-газу реагує з середовищем газифікації (парою). Кальцій, що утворюється в процесі піролізу біомаси, транспортується разом із шаром матеріалу від газифікатора до камери згоряння. Обвуглена

біомаса реагує з повітрям у камері згоряння з виділенням теплоти горіння, яка в кінцевому підсумку переноситься в газифікатор за рахунок циркуляції шару матеріалу. Циркуляція твердих речовин у системі з подвійним киплячим шаром підтримує процес газифікації біомаси. Циклонний сепаратор, контур-ущільнювач і з'єднувальна труба між газифікатором і камерою згоряння, також включені в систему для підтримки циркуляції твердих речовин. Системи з подвійним киплячим шаром, газифікатор і камера згоряння можуть бути або з барботизованим киплячим шаром (БКШ), або зі стояковим реактором. Завдяки тривалішому часу перебування біомаси в газифікаторі та більш високій конверсії біомаси поєднання БКШ-газифікатора та стоякової камери згоряння більш перспективне.

У праці [33] розглянуто циркулюючі газифікатори з псевдозрідженим шаром двох типів – з подвійною циркуляцією і стоякового типу. Показано, що циркулюючі реактори з псевдозрідженим шаром (Circulating fluidized bed (CFB)) широко використовуються для газифікації та спалювання вугілля завдяки таким перевагам, як гнучкість палива та низькі викиди забруднюючих речовин. Завдяки великому потенціалу технологія газифікації вугілля під тиском CFB привертає все більшу увагу. Добре розуміння механізму зв'язку між газо-твердим потоком та хімічними реакціями в процесі газифікації необхідне для проектування та масштабування реакторів CFB.

Типовий газифікатор з барботажним псевдозрідженим шаром розглядається у статті [34]. Розглянуто дві моделі гетерогенних реакцій. Показано, що модель відкритого ядра зазвичай використовується для описання реакцій між вугіллям і газом. Результуюча швидкість реакції контролюється як дифузією частинок газу через пограничний шар газу, так і кінетикою поверхневої реакції, яка залежить від температури, складу газового середовища, розміру й температури частинок вугілля.

У працях [35, 36] розглядається газифікатор CFB стоякового типу. Експериментальні дослідження [35] проведено на дослідному газифікаторі CFB стоякового типу потужністю 50 кВт.

Порівняння технологічних параметрів роботи газифікаторів Bubbling Fluidized Bed (BFB) і CFB наведено у статті [37]. Показано, що одержаний у газифікаторі типу CFB синтез-газ містить більше CO і H₂, ніж синтез-газ із газифікатора типу BFB.

У статті [38] показано, що інтегрований комбінований цикл газифікації із захопленим потоком вуглецю є життєздатною технологією керування парниковими газами при використанні вугілля для виробництва електроенергії або отримання водню.

Дослідженню кінетики хімічних реакцій горіння та газифікації вугілля також присвячено значну кількість експериментальних робіт, зокрема [20, 39]. У статті [20] було виконано близько ста експериментів з окиснення напівкоксу за атмосферного і підвищеного тиску з двома розмірами (70 мкм і 40 мкм) вугільних частинок за повного тиску 1, 5, 10 і 15 атм. Температури реактора варіювалися між 1000 К і 1500 К із вмістом кисню від 5 % до 21 % в об'ємі газу, що приводило до середньої температури частинок у діапазоні від 1400 К до 2100 К та їх вигорання від 15 % до 96 %. Незалежно виміряна температура частинок і повна швидкість реакції дали змогу провести внутрішню перевірку узгодженості даних і дали уявлення про продукти згоряння. Частинки напівкоксу згоряли в режимі зменшення густини та зменшення діаметра в проміжному режимі між кінетичною зоною і зоною дифузії пор незалежно від повного тиску. Значне утворення CO на поверхні відбувалося за температури частинок нижчої за 1800 К у всьому діапазоні зміни тиску. Температура частинок суттєво залежить від кисню і тиску. Підвищений тиск кисню за сталого повного тиску призводив до значного підвищення температури частинок, тоді як підвищення повного тиску за постійного тиску кисню призводило до істотного зниження температури частинок. Підвищення повного тиску від 1 атм до 5 атм у середовищі з незмінним газовим складом призвело до помірного підвищення швидкості реакції. Швидкість реакції зменшувалася з подальшим підвищенням тиску. Результати експериментів показують, що глобальні кінетичні параметри тиску оточуючого середовища неможна точно екстраполювати на підвищений тиск. Уявні коефіцієнти швидкості реакції (основані на формі парціального тиску в рівнянні швидкості *n*-го порядку) показали значну залежність від тиску, оскільки як енергія активації, так і частотний коефіцієнт зменшилися з підвищенням тиску. Це свідчить про те, що емпіричні рівняння швидкості *n*-го порядку стають некоректними в діапазоні зміни тиску, використаного в експериментах. Однак моделювання показує, що глобальна модель може використовуватися для моделювання окиснення напівкоксу за підвищеного тиску за умови застосування кінетичних параметрів, залежних від тиску.

У статті [39] наведено дані експериментально визначених значень власних швидкостей реакцій двох марок австралійського вугілля з O₂, CO₂ і H₂O під дією підвищеного тиску (до 30 атм) з використанням термогравіметричного аналізатора. Виявлено, що порядок реакції в CO₂ і H₂O не був постійним у

дослідженому діапазоні тиску й варіюється від 0,5 до 0,8 за атмосферного тиску та знижується за тиску, вищого за 10 атм. Уявний порядок реакції в кисні менше залежить від тиску в діапазоні 1–16 атм. Площа поверхні обвуглювання після реакції для більш високого тиску зазвичай була більшою, ніж після реакції під час більш низького тиску. Це привело до зниження впливу тиску на власну швидкість за умов 10 % конверсії. Енергія активації для всіх трьох реакцій майже не змінюється зі збільшенням тиску реакції. Отримані дані про власні швидкості були використані для оцінки високотемпературної реакційної здатності обвуглювання з використанням базових знань про структуру пір зразків. Використання даних щодо власної швидкості реакції та структури напівкоксу дало змогу прогнозувати поведінку вугілля в умовах високотемпературної газифікації.

Відомо [1, 2], що сирий синтез-газ залишає газогенератор за високої температури, а інколи і за високого тиску і містить велику кількість домішок. Тому газогенераторні установки обов'язково містять системи утилізації теплоти та очищення газу. Найбільшого поширення мають схеми, в яких гарячі гази з газогенератора охолоджуються в паровому котлі-утилізаторі.

У разі газифікації під тиском газ може бути використаний у газотурбінній установці, проте при цьому необхідне його високотемпературне очищення від пилу. Зазвичай для очищення синтез-газу охолоджують, при цьому конденсуються смола і водяна пара. Пил, що міститься в синтез-газі в кількості (50–150) г/м³, видаляють у циклонах. За двоступінчатого циклонного очищення вміст пилу знижується до (20–40) мг/м³. Більш повне очищення здійснюється у фільтрах різної конструкції.

Під час газифікації майже вся сірка (S), що міститься у вихідному паливі, перетворюється на H₂S, для видалення якого застосовують сорбцію або різноманітні рідкі розчинники, наприклад диметилловий ефір, етиленгліколь. При цьому зазвичай видаляється і CO₂. Синтез-газ, який використовується для одержання СН₃ОН, промивають метанолом за температури 150 °С. У цьому разі з газу видаляються майже всі домішки, проте вартість такого очищення зростає. Реагенти, що поглинають домішки з газу, регенерують, а найшкідливіші домішки перетворюють на речовини, що допускають їхню безпечну утилізацію.

Сучасний стан виробництва та використання синтез-газу у світі

Глобальне потепління, спричинене забрудненням парниковими газами атмосфери Землі, політична нестабільність у деяких газо- та нафтовидобувних країнах дало новий поштовх розвитку та застосуванню технології газифікації у світі. Екологічна загроза зміни клімату на планеті підкреслює необхідність відмови від прямого використання багатих вуглецем викопних видів палива.

У цьому контексті газифікація є логічним вибором для перетворення поновлюваних вуглецево-нейтральної біомаси і вуглецевмісного палива на синтез-газ. Пошуки енергетичної незалежності та нестабільність цін на природний газ та нафту спонукають деякі країни визнати необхідність розвитку та використання сучасних технологій газифікації твердого палива (бурого вугілля, торфу), біомаси, промислових і побутових відходів тощо.

Натепер технологія газифікації розвивається і є чимало прикладів комерційно-успішної практичної реалізації проєктів. Розглянемо декілька прикладів підприємств з виробництва та використання газогенераторного газу.

Застосування газифікатора з нерухомим шаром та висхідним потоком в енергетиці (Nexterra Systems Corp. [40]). Основна технологія компанії Nexterra – це система газифікації нерухомого шару з висхідним потоком. Ці системи мають теплову потужність від 2 МВт до 40 МВт і електричну від 2 МВт до 15 МВт. Системи Nexterra прості в конструкції, обробляють різноманітні вихідні матеріали й генерують надзвичайно низькі викиди.

Сучасні системи енергетики Nexterra Systems Corp. виробляють чистий синтез-газ, придатний для спалювання у високоефективних двигунах внутрішнього згорання, призначених для стаціонарного енергозабезпечення (ТЕЦ). Цей високоефективний комплекс є найбільш привабливим для районних електростанцій і незалежних виробників електроенергії. Така система потужністю 2 МВт працює в Університеті Британської Колумбії.

Технічні характеристики установки для виробництва електроенергії Nexterra Systems Corp.:

- потужність: від 2 МВт до 10 МВт;
- ККД системи: комбінований цикл 30 %, ТЕЦ до 60 %;
- види палива: дерево залишки, будівельне сміття, тверді речовини біологічного походження;
- тип газифікатора: нерухомий шар з висхідним потоком;
- витрата палива: (35–140) т/добу;

- вологість палива: (6–60) %;
- розмір частинок твердого палива: ≤ 75 мм.

Застосування газифікатора з псевдозрідженим шаром і циркуляцією (Foster Wheeler) реалізоване на електростанції Kumpuljärvi II у м. Lahti (Finland) компанії Lahti Energia [41]. Ця електростанція, яка базується на газифікації, розпочала працювати у травні 2012 р. і забезпечує теплову потужність на опалення (90 МВт) та електричну потужність (50 МВт). Станція газифікації привертає величезну увагу в інших країнах і є прикладом для майбутніх «зелених» (екологічних) електростанцій.

Застосування газифікатора з бульбашковим псевдозрідженим шаром у м. Varkaus (Finland) [42]. Подібні газифікатори є економічно ефективними для потужності (15–40) МВт, тоді як газифікатори Foster Wheeler доцільно застосовувати за великої потужності (40–100) МВт.

Газифікатор з псевдозрідженим шаром під тиском застосовано на електростанції в м. Värnamo (Sweden) [43]. Газифікатор працює на подрібненій деревині і біомасі. Нижча робоча температура згорання синтез-газу становить 5 МДж/м³. Система працює на парогазовому циклі режимі ТЕЦ: 4,2 МВт – електрична потужність газової турбіни; 1,8 МВт – електрична потужність парової турбіни з параметрами (40 бар, 455 °С); разом електрична потужність становить 6 МВт, а теплова – 9 МВт. Робочий тиск у газифікаторі становить 22 бар за температури 950 °С. Загальний ККД системи становить 83 % за електричного ККД 32 %.

Застосування газифікатора ПГС Siemens на електростанції в м. Freiberg, Germany [44]. Газифікатор Siemens потужністю 5 МВт, працює на бурому вугіллі, робочий тиск 30 бар за температури 1400 °С. Синтез-газ, що одержується в газифікаторі типу ПГС Siemens, окрім, виробництва електроенергії за комбінованим циклом, застосовується для отримання метанолу, аміаку і водню. При цьому компанія Siemens виготовляє не тільки газифікатори, але і весь необхідний асортимент обладнання для електростанцій.

Також протягом тривалого часу газифікація залишається одним з найбільш ефективних методів утилізації й полімервмісних відходів, коли їхнє повторне перероблення на різноманітну продукцію ускладнене або недоцільне (ідентифікація, забруднення, зміна властивостей через старіння тощо) [45–47].

Висновки. Аналіз досліджень виробництва синтез-газу з кам'яного вугілля і біомаси, його використання для генерування тепла та електроенергії дає підставу зробити такі висновки:

- 1) Сировиною для процесу газифікації палива зазвичай є кам'яне і буре вугілля, горючі сланці, торф, деревина, мазут, гудрон.
- 2) Реакції, що проходять під час газифікації твердого палива, містять такі гетерогенні та гомогенні реакції: окиснення напівкоксу, газифікації CO₂, H₂O і H₂, пряма і зворотна реакції синтез-газу, утворення метану, розкладу метану з відновленням водню тощо.
- 3) У промисловості використовуються газифікатори трьох основних типів, що різняться за характером взаємодії твердого палива з дуттям: у потоці, з нерухомим або рухомим шаром, з псевдозрідженим шаром. Найпотужнішими газогенераторами є газифікатори з газифікацією в потоці (до 1000 МВт).
- 4) У світі технологія газифікації стрімко розвивається і є чимало прикладів комерційно-успішної реалізації проектів, призначених для генерування електроенергії та тепла, зокрема: Nexterra Systems Corp., Vancouver, British Columbia, Canada потужністю 2–10 МВт, ККД ТЕЦ до 60 %, газифікатор – нерухомий шар з висхідним потоком; газифікатор з бульбашковим псевдозрідженим шаром на електростанції в м. Värnamo, Sweden – електричною потужністю 6 МВт і тепловою потужністю 9 МВт; газифікатор Siemens на електростанції в м. Freiberg, Germany – працює на бурому вугіллі, робочий тиск 30 бар і температура 1400 °С, електрична потужність 5 МВт та ін.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено розробити технічні рішення з часткової заміни природного газу на синтез-газ у технологічному процесі високотемпературного оброблення вуглевмісних сипучих матеріалів у прожарювальних обертових печах з використанням теплоти матеріалу, що виходить з печі, для забезпечення температурних умов процесу газифікації. Також планується здійснити аналіз існуючих математичних моделей процесу газифікації вуглецевмісної сировини з метою визначення їхньої придатності для аналізу процесу газифікації.

Список використаної літератури

1. Basu P. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. London, New York : Elsevier Inc., 2010. 365 p.
2. Higan C., Burgt van der M. Gasification. London, New York : Elsevier Inc., 2010. 435 p.
3. Карвацький А. Я. Техніко-економічне обґрунтування використання торф'яного синтез-газу в енергетиці //

- Вісник НТУУ "КПІ". Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2013. №1(11). С. 73–77.
4. Littlewood K. Gasification: theory and application // Progress in Energy and Combustion Science. 1977. Vol. 3, No 1. P. 35-71. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(77\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0360-1285(77)90008-9)
 5. Measurement and Prediction of Entrained-Flow Gasification Processes / B. W. Brown, L. D. Smoot, P. J. Smith, P. O. Hedman // AIChE Journal. 1988. Vol. 34, No 3. P. 435-446. <https://doi.org/10.1002/aic.690340311>
 6. Modelling coal gasification with a hybrid neural network / B. Guo, Y. Shen, D. Li, F. Zhao // Fuel. 1997. Vol. 76 (12). P. 1159-1164. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00122-1)
 7. Garcia X. A., Alarcon N. A., Gordon A. L. Steam gasification of tars using a CaO catalyst source // Fuel Processing Technology. 1999. Vol. 58, No 2. P. 83-102.
 8. Combustion and Gasification of Coal / A. Williams, M. Pourkashanian, J. M. Jones, N. Skorupska. New York : Taylor & Francis, 2000. 336 p.
 9. Steam-gasification of biomass in a fluidized-bed of olivine particles / S. Rapagna, N. Jand, A. Kiennemann, P. U. Foscolo // Biomass and Bioenergy. 2000. Vol. 19, No 3. P. 187-197. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00031-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00031-3)
 10. Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier / X. T. Li, J. R. Grace, A. P. Watkinson et al. // Fuel. 2001. Vol. 80, No 2. P. 195-207. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00074-0)
 11. Govind R., Shah J. Modeling and Simulation of An Entrained Flow Coal Gasifier // AIChE Journal. 1984. Vol. 30, No 1. P. 79-92. <https://doi.org/10.1002/aic.690300113>
 12. Lee I., Kim M. S., Ihm S. K. Gasification of glucose in supercritical water // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2002. Vol. 41. P. 1182-1188. DOI: 10.1021/ie010066i
 13. Catalytic effects of NaOH and ZrO₂ for partial oxidative gasification of n-hexadecane and lignin in supercritical water / M. Watanabe, H. Inomata, M. Osada et al. // Fuel. 2003. Vol. 82. P. 545-552. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00320-4
 14. Biomass gasification kinetics: influence of pressure and char structure / E. Cetin, B. Moghtaderi, R. Gupta, T. F. Wall // Combustion Science and Technology. 2005. Vol. 177, No 4. P. 765-791. DOI: 10.1080/00102200590917266
 15. Hou K., Hughes R. The kinetics of methane steam reforming over a Ni/a-Al₂O catalyst // Chemical Engineering Journal, 2001. Vol. 82. P. 311-328. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00367-3)
 16. Klose W., Wolki M. On the intrinsic reaction rate of biomass char gasification with carbon dioxide and steam // Fuel. 2005. Vol. 84, No 7-8. P. 885-892. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.016>
 17. Minchener A. J. Coal gasification for advanced power generation // Fuel. 2005. Vol. 23, No 17. P. 2222-2235. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.08.035>
 18. Petersen L., Werther J. Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed // Chemical Engineering and Processing. 2005. Vol. 44, No 7. P. 717-736. DOI: 10.1016/j.cep.2004.09.001
 19. Development of fragmentation models for solid fuel combustion and gasification as subroutines for inclusion in CFD codes / N. Syred, K. Kurniawan, T. Griffith et al. // Fuel. 2007. Vol. 86, No 14. P. 2221-2231. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.060>
 20. Char Oxidation At Elevated Pressures / C. R. Monson, G. J. Germane, A. U. Blackdam, L. D. Smoot // Combustion and Flame. 1995. Vol. 100. P. 669-683. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)00178-U](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)00178-U)
 21. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water – a systematic experimental and analytical study / L. J. Guo, Y. J. Lu, X. M. Zhang et al. // Catalysis Today. 2007. Vol. 129, No 3-4. P. 275-286. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.082
 22. Model for biomass char combustion in the riser of a dual fluidized bed gasification unit: Part 1 – Model development and sensitivity analysis / P. Kaushal, T. Proll, H. Hofbauer // Fuel Processing Technology. 2008. Vol. 89, No 7. P. 651-659. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.12.009>
 23. Bubbling fluidized bed gasification – performance, process findings and energy analysis / M. T. Lim, Z. Alimuddin // Renewable Energy. 2008. Vol. 33, No 10. P. 2339-2343. DOI: 10.1016/j.renene.2008.01.014
 24. Olivine as a tar removal catalyst during fluidized bed gasification of plastic waste / M. L. Mastellone, U. Arena // AIChE Journal. 2008. Vol. 54, No 6. P. 1656-1667. DOI: 10.1002/aic.11497

25. Chemical looping gasification of biomass for hydrogen enriched gas production with in-process carbon-dioxide capture / B. Acharya, A. Dutta, P. Basu // *Energy & Fuels*. 2009. Vol. 23, No 10. P. 5077-5083. <https://doi.org/10.1021/ef9003889>
26. Blasi C. D. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009. Vol. 35, No 2. P. 121-140. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.08.001>
27. Xiang Jun Liu, Wu Rong Zhang, Tae Jun Park. Modelling coal gasification in an entrained flow gasifier, *Combustion Theory and Modelling*. 2001. Vol. 5:4. P. 595-608. <http://dx.doi.org/10.1088/1364-7830/5/4/305>
28. Numerical study on the coal gasification characteristic in an entrained flow coal gasifier / Y. C. Choi, X. Y. Li, Y. J. Park et al. // *Fuel*. 2001. Vol. 80, No 15, P. 2193-2201 DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00101-6.
29. Modelling coal gasification with CFD and discrete phase method / S.-P. Shi, S. E. Zitney, M. Shahnam et al. // *Journal of the Energy Institute*. 2006. Vol. 79, No 4, p. 217-221. DOI: 10.1179/174602206X148865
30. Watanabe H., Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier // *Fuel*. 2006. Vol. 85, P. 1935-1943. DOI:10.1016/j.fuel.2006.02.002
31. Three-Dimensional Simulation for an Entrained Flow Coal Slurry Gasifier / Yuxin Wu, Jiansheng Zhang, Philip J. Smith et al. // *Energy Fuels* 2010. Vol. 24. P. 1156-1163 : DOI:10.1021/ef901085b
32. Hui Liu, Robert J. Cattolica, Reinhard Seiser. Operating parameter effects on the solids circulation rate in the CFD simulation of a dual fluidized-bed gasification system // *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 169, No 21. P. 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.040>
33. Yawen Zhang, Fulin Lei, Yunhan Xiao. Computational fluid dynamics simulation and parametric study of coal gasification in a circulating fluidized bed reactor // *Asia-Pac. J. Chem. Eng.* 2015. Vol. 10. No 2. P. 307-317. DOI: 10.1002/apj.1878
34. CFD simulation of dense particulate reaction system: Approaches, recent advance and applications / Wenqi Zhong, Aibing Yu, Guanwen Zhou et al. // *Chemical Engineering Science*. 2016 Vol. 140. P. 16-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.035>
35. Three-dimensional Eulerian-Eulerian Simulation of Coal Combustion under Air Atmosphere in a Circulating Fluidized Bed Combustor / Ying Wu, Daoyin Liu, Jiliang Ma, Xiaoping Chen // *Energy & Fuels*. 2017. Vol. 31. No 8, P. 7952-7966. DOI: 10.1021/acs.energyfuels
36. 2.5D CFD simulations of gas–solids flow in cylindrical CFB risers / Li Peng, Yingya Wu, Chengxiu Wang et al. // *Powder Technology*. 2016. Vol. 291. P. 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.018>
37. Sharma V., Agarwal V. K. Numerical simulation of coal gasification in a circulating fluidized bed gasifier // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2019. Vol. 36, No 3, P. 1289-1301. dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20190363s20180423.
38. Simulation of Entrained Flow Coal Gasification / E. H. Chui, A. J. Majeski, D. Y. Lu et al. // *Energy Procedia*. 2009. Vol. 1. P. 503-509 <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.067>
39. Roberts D. G., Harris D. J. Char Gasification with O₂, CO₂, and H₂O: Effects of Pressure on Intrinsic Reaction Kinetics // *Energy & Fuels*. 2000. Vol. 14. P. 483-489. <https://doi.org/10.1021/ef9901894>
40. Nexterra Systems Corp. URL: <http://www.nexterra.ca/files/corporate-profile.php> (data of access: 05.04.2020).
41. Инновационная теплоэлектростанция города Лахти. URL: <https://makron.com/ru/otzyvy/innovacionnaa-terpoelektrostantsia-goroda-lahti/> (дата доступу: 05.04.2020).
42. Gasification plant for plastic residue of Corenso Oy, Varkaus. URL: https://www.researchgate.net/figure/Gasification-plant-for-plastic-residue-of-Corenso-Oy-Varkaus_fig3_30482338 (data of access: 05.04.2020).
43. Värnamo Demonstration Plant, Sweden. URL: http://www.ducente.se/images/content/pdf/success_story_vmo_bigcc_demo_plant.pdf (data of access: 05.04.2020).
44. Siemens Gasification Technology. URL: http://www.chemwinfo.com/private_folder/Uploadfile2014May/Siemensgasificationtechnology.pdf (data of access: 05.04.2020).
45. Мікульонюк І. О., Рябцев Г. Л. Основні методи і шляхи використання полімервмісних відходів // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2001. № 2. С. 135–147.
46. Мікульонюк І. О. Основні методи використання гумовмісних відходів // *Хімічна промисловість України*. 2001. № 5. С. 53–58.
47. Mikulionok I. O. Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011. Vol. 83, No 6. P. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1070427211060371

Надійшла до редакції 07.04.2020

Panov Ye. M., Karvatskii A. Ya., Leleka S. V., Mikulionok I. O.

THE CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF MANUFACTURE AND USING SYNTHESIS GAS BASED ON THE CARBON GASIFICATION REACTION. PART 1. ANALYSIS OF THE GASIFICATION PROCESS AND ITS PRACTICAL APPLICATION

Significant fluctuations in the price of natural gas are the reason for the transition of the energy and energy-intensive industries to increase the use of solid fuels with their preliminary gasification, that is, the residual conversion of the organic part of solid or liquid fuels to combustible gas by its interaction at high temperature (1000–2000 °C) with air, water vapor, industrial oxygen and carbon dioxide, as well as mixtures thereof. The gasification process is carried out in gas generators, so the resulting gas is called generator gas.

Analysis of studies of the production of synthetic gas from coal and biomass, its use to generate heat and electricity shows that the raw materials for the process of gasification of fuel are usually coal and brown coal, oil shale, peat, wood, fuel oil, tar; reactions occurring during gasification of solid fuels include the following heterogeneous and homogeneous reactions: oxidation of semicoke, gasification of CO₂, H₂O and H₂, direct and reverse water vapor reactions, methane formation, methane decomposition with hydrogen reduction, etc.; gasifiers of three main types are used in industry, which differ in the nature of the interaction of solid fuel with blast: in the stream, with a fixed or moving bed, with a fluidized bed.

The most powerful gas generators are gasifiers with gasification in the stream (up to 1000 MW); gasification technology is developing rapidly in the world and there are many examples of commercial-successful implementation of projects designed to generate electricity and heat, in particular: Nexterra Systems Corp., Vancouver, British Columbia, Canada with a capacity of 2–10 MW, efficiency of thermal power station up to 60 %, gasifier – fixed bed with upward flow; a bubble fluidized gasifier at a power plant in Värnamo, Sweden with an electric capacity of 6 MW and a thermal capacity of 9 MW; Siemens gasifier at a power station in Freberg, Germany works on brown coal, operating pressure 30 bar and temperature 1400 °C, electric power 5 MW, etc.

In the future, it is planned to develop technical solutions for the partial replacement of natural gas with synthetic gas in the technological process for the high-temperature processing of carbon-containing bulk materials in rotary kilns using the heat of the material leaving the furnace to ensure the temperature conditions of the gasification process. It is also planned to analyze existing mathematical models of the process of carbon-containing raw materials gasification in order to determine their applicability for the analysis of the gasification process.

Keywords: carbon, fuel, gasification, synthetic gas.

References

1. Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory, Elsevier Inc., London, New York.
2. Higman, C., Burgt van der, M. (2010). Gasification, Elsevier Inc., London, New York.
3. Karvatskii, A. Ya. (2013). Tekhniko-economiche obgrutuvannia vykorystannia torfianoho syntezy-gazu v enerhetytsi [The feasibility study on the use of peat synthesis gas in the energy sector]. *Visnyk NTUU "KPI". Khimichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, No 1 (11), pp. 73–77.
4. Littlewood, K. (1977). Gasification: theory and application, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 3, no 1, pp. 35-71. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(77\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0360-1285(77)90008-9)
5. Brown, B. W., Smoot, L. D., Smith, P. J., Hedman P. O. (1988). Measurement and Prediction of Entrained-Flow Gasification Processes, *AIChE Journal*. vol. 34, no 3, P. 435-446. <https://doi.org/10.1002/aic.690340311>
6. Guo, B., Shen, Y., Li, D., Zhao, F. (1997). Modelling coal gasification with a hybrid neural network, *Fuel*, vol. 76, no 12, pp. 1159-1164. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00122-1)
7. Garcia, X. A., Alarcon, N. A., Gordon, A. L. (1999). Steam gasification of tars using a CaO catalyst source, *Fuel Processing Technology*, vol. 58, no 2, pp. 83-102.
8. Williams, A., Pourkashanian, M., Jones, J. M., Skorupska, N. (2000). Combustion and Gasification of Coal, Taylor & Francis, New York.
9. Rapagna, S., Jand, N., Kiennemann, A., Foscolo, P. U. (2000). Steam-gasification of biomass in a fluidized-bed of olivine particles, *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, no 3, pp. 187-197. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00031-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00031-3)

10. Li, X. T., Grace, J. R., Watkinson, A. P., Lim, C. J., Ergudenler, A. (2010). Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier, *Fuel*, vol. 80, no 2, pp. 195-207. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00074-0)
11. Govind, R., Shah, J. (1984). Modeling and Simulation of An Entrained Flow Coal Gasifier, *AIChE Journal*, vol. 30, No 1, pp. 79-92. <https://doi.org/10.1002/aic.690300113>
12. Lee, I., Kim, M. S., Ihm, S. K. (2002). Gasification of glucose in supercritical water, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 41, pp. 1182-1188. DOI: 10.1021/ie010066i
13. Watanabe, M., Inomata, H., Osada, M., Sato, T., Adschiri, T., Arai, K. (2003). Catalytic effects of NaOH and ZrO₂ for partial oxidative gasification of n-hexadecane and lignin in supercritical water, *Fuel*, vol. 82, pp. 545-552. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00320-4
14. Cetin, E., Moghtaderi, B., Gupta, R., Wall, T. F. (2005). Biomass gasification kinetics: influence of pressure and char structure, *Combustion Science and Technology*, vol. 177, no 4, pp. 765-791. DOI: 10.1080/00102200590917266
15. Hou, K., Hughes, R. (2001). The kinetics of methane steam reforming over a Ni/a-Al₂O catalyst, *Chemical Engineering Journal*, vol. 82, pp. 311-328 [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00367-3)
16. Klose, W., Wolki, M. (2005). On the intrinsic reaction rate of biomass char gasification with carbon dioxide and steam, *Fuel*, vol. 84, no 7-8, pp. 885-892. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.11.016>
17. Minchener, A. J. (2005). Coal gasification for advanced power generation, *Fuel*, vol. 23, no 17, pp. 2222-2235. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.08.035>
18. Petersen, L. Werther, J. (2005). Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44, no 7, pp. 717-736. DOI: 10.1016/j.ccep.2004.09.001
19. Syred, N., Kurniawan, K., Griffith, T., Gralton, T., Ray, R. (2007). Development of fragmentation models for solid fuel combustion and gasification as subroutines for inclusion in CFD codes, *Fuel*, vol. 86, no 14, pp. 2221-2231. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.060>
20. Monson, C. R., Germane, G. J., Blackdam, A. U., Smoot, L. D. (1995). Char Oxidation At Elevated Pressures, *Combustion and Flame*, vol. 100, pp. 669-683. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)00178-U](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)00178-U)
21. Guo, L. J., Lu, Y. J., Zhang, X. M., Ji, C. M., Guan, Y., Pei, A. X. (2007). Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water – a systematic experimental and analytical study, *Catalysis Today*, vol. 129, no 3-4, pp. 275-286. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.07.082
22. Kaushal, P., Proll, T., Hofbauer, H. (2008). Model for biomass char combustion in the riser of a dual fluidized bed gasification unit: Part 1 – Model development and sensitivity analysis, *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no 7, pp. 651-659. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.12.009>
23. Lim, M. T., Alimuddin, Z. (2008). Bubbling fluidized bed gasification – performance, process findings and energy analysis, *Renewable Energy*, vol. 33, no 10, pp. 2339-2343. DOI: 10.1016/j.renene.2008.01.014
24. Mastellone, M. L., Arena, U. (2008). Olivine as a tar removal catalyst during fluidized bed gasification of plastic waste, *AIChE Journal*, vol. 54, no 6, pp. 1656-1667. DOI: 10.1002/aic.11497
25. Acharya, B., Dutta, A., Basu, P. (2009). Chemical looping gasification of biomass for hydrogen enriched gas production with in-process carbon-dioxide capture, *Energy & Fuels*, vol. 23, no 10, pp. 5077-5083. <https://doi.org/10.1021/ef9003889>
26. Blasi, C. D. (2009). Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no 2, pp. 121-140. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.08.001>
27. Xiang Jun Liu, Wu Rong Zhang, Tae Jun Park (2001). Modelling coal gasification in an entrained flow gasifier, *Combustion Theory and Modelling*, vol. 5:4, pp. 595-608 <http://dx.doi.org/10.1088/1364-7830/5/4/305>
28. Choi, Y.C., Li, X.Y., Park, Y.J., Kim, J.H., Lee, J.G. (2001) Numerical study on the coal gasification characteristic in an entrained flow coal gasifier, *Fuel*, vol. 80, no 15, pp. 2193-2201 DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00101-6.
29. Shi, S.-P., Zitney, S. E., Shahnam, M., Syamlal, M., Rogers, W. A. (2006) Modelling coal gasification with CFD and discrete phase method, *Journal of the Energy Institute*, vol. 79, No 4, pp. 217-221. DOI 10.1179/174602206X148865
30. Watanabe, H., Otaka, M. (2006) Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier, *Fuel*, vol. 85, pp. 1935-1943. doi:10.1016/j.fuel.2006.02.002
31. Yuxin Wu, Jiansheng Zhang, Smith, Ph. J., Hai Zhang, Reid, Ch., Junfu Lv, Guangxi Yue (2010). Three-

- Dimensional Simulation for an Entrained Flow Coal Slurry Gasifier, *Energy Fuels*, vol. 24, pp. 1156-1163 : DOI:10.1021/ef901085b
32. Hui Liu, Cattolica, R. J., Seiser, R. (2017) Operating parameter effects on the solids circulation rate in the CFD simulation of a dual fluidized-bed gasification system, *Chemical Engineering Science*, vol. 169, no 21, pp. 235-245 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.040> 111
 33. Yawen Zhang, Fulin Lei, Yunhan Xiao (2015). Computational fluid dynamics simulation and parametric study of coal gasification in a circulating fluidized bed reactor, *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, vol. 10, no 2, pp. 307-317. DOI: 10.1002/apj.1878
 34. Wenqi Zhong, Aibing Yu, Guanwen Zhou, Jun Xie, Hao Zhang (2016). CFD simulation of dense particulate reaction system: Approaches, recent advance sand applications, *Chemical Engineering Science*, vol. 140, pp. 16-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.035>
 35. Ying Wu, Daoyin Liu, Jiliang Ma, and Xiaoping Chen (2017). Three-dimensional Eulerian-Eulerian Simulation of Coal Combustion under Air Atmosphere in a Circulating Fluidized Bed Combustor, *Energy & Fuels*, vol. 31, no 8, pp. 7952-7966. DOI: 10.1021/acs.energyfuels
 36. Li Peng, Yingya Wu, Chengxiu Wang, Jinsen Gao, Xingying Lan (2016). 2.5D CFD simulations of gas–solids flow in cylindrical CFB risers, *Powder Technology*, vol. 291, pp. 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.018>
 37. Vikrant Sharma, Vijay K. Agarwal (2019). Numerical simulation of coal gasification in a circulating fluidized bed gasifier, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 36, No 3, pp. 1289-1301. dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20190363s20180423.
 38. Chui, E. H., Majeski, A. J., Lu, D. Y., Hughes, R., Gao, H., McCalden, D. J., Anthony, E. J. (2009). Simulation of Entrained Flow Coal Gasification, *Energy Procedia*, Vol. 1, pp. 503-509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.067>
 39. Roberts, D. G., Harris, D. J. (2000). Char Gasification with O₂, CO₂, and H₂O: Effects of Pressure on Intrinsic Reaction Kinetics, *Energy & Fuels*, vol. 14, pp. 483-489. <https://doi.org/10.1021/ef9901894>
 40. Nexterra Systems Corp. URL: <http://www.nexterra.ca/files/corporate-profile.php> (data of access: 05.04.2020).
 41. *Innovatsionnaya teploelektrostantsiya goroda Lakhti* [Innovative Thermal Power Station in Lahti]. URL: <https://makron.com/ru/otzyvy/innovacionnaa-teploelektrostantsia-goroda-lahti/> (data of access: 05.04.2020).
 42. Gasification plant for plastic residue of Corenso Oy, Varkaus. URL: https://www.researchgate.net/figure/Gasification-plant-for-plastic-residue-of-Corenso-Oy-Varkaus_fig3_30482338 (data of access: 05.04.2020).
 43. Värnamo Demonstration Plant, Sweden. URL: http://www.ducente.se/images/content/pdf/success_story_vmo_bigcc_demo_plant.pdf (data of access: 05.04.2020).
 44. Siemens Gasification Technology. URL: http://www.chemwinform.com/private_folder/Uploadfile2014May/Siemensgasificationtechnology.pdf (data of access: 05.04.2020).
 45. Mikulionok, I. O., Riabtsev, G. L. (2001). Osnovni metody i shliakhy vykorystannia polimervmisnykh vidkhodiv [The main methods and ways of using polymer-containing waste], *Naukovi visti NTUU «KPI»*, no 2, pp. C. 135-147.
 46. Mikulionok, I. O. (2001). Osnovni metody vykorystannia humovmisnykh vidkhodiv [Basic methods for the use of rubber waste], *Khimichna promyslovist Ukrainy*, no 5, pp. 53-58.
 47. Mikulionok, I. O. (2011). Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material, *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 83, no 6, pp. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1070427211060371