

РЕАЛІЗАЦІЯ ТА СТІЙКІСТЬ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ БІОМАСИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

С.В. Петров¹, О.І. Сом², С.Г. Бондаренко³, О.В. Сангінова³, М. Ганчарський⁴, Е. Рой⁴

¹Інститут газу НАН України. 03113, м. Київ, вул. Дегтярівська, 39. E-mail: vizana.sp@gmail.com

²ТОВ фірма «Плазма-Мастер». 03142, м. Київ, вул. Омеляна Прицака, 3. E-mail: info@plasma-master.com

³НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, Берестейський просп., 37. E-mail: s_g_bondarenko@ukr.net

⁴Hydrogenium P.S.A. (Simple Joint Stock Company).

20-029, м. Люблін, вул. Марії Склодовської-Кюрі, 3/27, Польща. E-mail: mg@hydrogenium.one

Технології газифікації відходів біомаси спрямовані на виробництво водню мають потенціал широкомасштабної комерціалізації. Передумовами для їхнього розвитку та просування є інноваційні підходи до моделювання; використання традиційних і нових механізмів газифікації, узгоджених із фундаментальними основами теоретичної фізики; розробка на цьому підґрунті нових технічних рішень. Зрештою, завдання полягає в істотному поліпшенні техніко-економічних та екологічних показників процесу газифікації. У такому контексті плазмова газифікація виявляється перспективним джерелом отримання відновлюваної енергії з різноманітних відходів, зокрема біомаси, а також сприяє досягненню цілей сталого розвитку: доступна й чиста енергія, боротьба зі зміною клімату, запобігання потраплянню відходів на сміттєзвалища та повторне використання ресурсів, що в сукупності зміцнює концепцію циркулярної економіки. Ця стаття містить аналіз і оцінку умов підвищення надійності, продуктивності та якості процесів газифікації при зниженні витрат, включно з потенційними перешкодами застосування плазмових технологій. У роботі показано нові технологічні рішення проблем стосовно газифікації, спрямовані на оптимізацію потоків енергії в реакторі газифікації, раціональне використання плазми як концентрованого потоку енергії, зниження споживання електроенергії плазмовими пальниками, зменшення потужності та вартості плазмових установок, а також радикального вирішення проблеми надійності газифікаційного обладнання. Розглянуто економічні перспективи переходу до великотоннажного виробництва для зниження капітальних і експлуатаційних витрат. Бібліогр. 85, рис. 22.

Ключові слова: газифікація біомаси, плазмова газифікація, плазмотрон, синтез-газ, газифікатор, енергоефективність процесу газифікації

Вступ. Технічне рішення з перетворення біомаси на паливний газ, що називається газифікацією, є ключовою технологією для отримання продуктів з більшою цінністю та потенційними можливостями застосування порівняно з вихідною сировиною. Необхідними умовами для розвитку цієї технології є передові, інноваційні та економічні методи з високим коефіцієнтом корисної дії. Стратегія підвищення здійсненності та стійкості процесу газифікації біомаси полягає в технологічному прогресі та мінімізації соціально-екологічних наслідків [1]. Використання біомаси має перевагу перед іншими поновлюваними джерелами енергії, оскільки воно менше залежить від місця розташування та клімату. Біомаса легко зберігається й транспортується, також доступна в достатній кількості. Це робить її життєздатною та перспективною сировиною в якості джерела енергії. Нині біомаса забезпечує понад 10 % світового енергопостачання та входить до четвірки найбільших джерел енергії за обсягом кінцевого світового споживання енергії [2].

Переробка відходів біомаси із застосуванням газифікації порівняно з іншими наявними методами, такими як захоронення, спалювання тощо, має перевагу, оскільки вона може перетворювати широкий спектр різноманітних вихідних матеріалів на безліч корисних продуктів. Газифікація біомаси являє собою складний процес, що включає підготовку сировини, потім комбінування піролізу, часткового спалювання проміжних продуктів з остаточною газифікацією, видаленням неорганічного залишку, очищенням і розділенням синтез-газу. Важливу роль у перетворенні проміжних продуктів — твердого вуглецю та важких вуглеводнів на низькомолекулярні гази, такі як монооксид вуглецю (CO) і водень (H₂), відіграє середовище газифікації. Якість і властивості синтез-газу залежать від складу вихідного матеріалу, розмірів, газифікуючого агента, розподілу температури і дуття в реакторі, а також від його конструкції. Газифікація біомаси дає безліч корисних складових на виході, зокрема: синтез-газ, тепло, електроенергію, зеле-

С.В. Петров — <https://orcid.org/0000-0003-0373-8003>, О.І. Сом — <https://orcid.org/0009-0009-4152-4832>,

С.Г. Бондаренко — <https://orcid.org/0000-0003-2305-6691>, О.В. Сангінова — <https://orcid.org/0000-0001-6378-7718>,

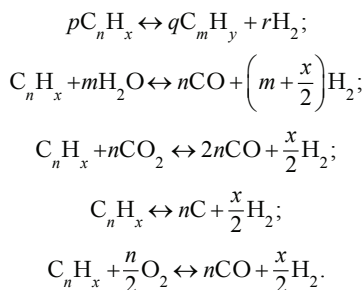
М. Ганчарський — <https://orcid.org/0009-0009-0355-0677>, Е. Рой — <https://orcid.org/0000-0002-8691-3315>

ний водень, добрива. Синтез-газ може бути додатково перероблений на метанол, диметиловий ефір та інші хімічні продукти.

Газифікація біомаси для виробництва водню забезпечує видатні переваги з точки зору поновлюваних енергоресурсів, вуглецевої нейтральності, високої ефективності та екологічних переваг. Проте фактори, що впливають на виробництво H_2 під час газифікації біомаси, є складними, що утруднює визначення оптимальних умов експлуатації [3].

Мета роботи — оцінити та класифікувати плазмові технології газифікації біомаси виходячи з умов підвищення продуктивності та якості при зниженні витрат, включно з потенційними перешкодами.

Результати дослідження. Спільним недоліком типових газифікаторів, як з висхідною, так і з низхідною або комбінованою тягою, є те, що більшою чи меншою мірою у виробленому газі містяться смоли, що є надто проблематичним для багатьох сучасних застосувань. Наявність смол вважається найбільш незручною проблемою, яку потрібно вирішувати, особливо під час роботи з великомасштабними системами. Традиційно як рішення використовується паровий риформінг за підвищених температур. Газифікація парою є ефективним методом, що добре зарекомендував себе [4, 5]. При цьому виробництво коксу та смол невелике, оскільки пара перетворює їх на CO і H_2 шляхом реакції водяного зсуву й риформінгу. Смоли ніколи не є бажаним продуктом і, отже, знижують ефективність процесу. Вихід смоли може бути зменшений шляхом термічного крекінгу, парового риформінгу, сухого риформінгу, вуглецеутворення та часткового окиснення, що показано в наступних реакціях:



Автори робіт [6–9] встановили, що вихід H_2 за парової газифікації в рази вищий, ніж за повітряної газифікації. Також повідомляється про підвищення економічної ефективності при збільшеному виробництві H_2 з використанням пари як середовища при газифікації. Слід зазначити корисну для подальших розробок технологічну

спробу подолання даної проблеми — це концепція багатоступеневої газифікації, яку застосовано в Danish Technical University (Данія) and Karlsruhe Institute of Technology (Німеччина) [10, 11]. Зазначена нетипова стратегія газифікації розділяє піроліз і газифікацію біомаси на окремі ступені з індивідуальним управлінням, які потім інтегруються. Піроліз і газифікація виконуються в розділених зонах всередині газифікатора. Це дає змогу переробляти біомасу в придатні для використання продукти. Основним мотивом такої концепції є отримання високоякісного чистого синтез-газу з низьким вмістом смол. Допустимі рівні смоли залежать від подальшого застосування. Вони становлять близько 50, 5 і 1 $mg \cdot m^{-3}$ для газових двигунів, газових турбін і паливних елементів відповідно до роботи [12]. У всіх випадках у вихлопі значною мірою присутні зола та пил. Життєво важливим етапом між виробництвом газу в газифікаторі та його утилізацією є очищення газу. Газ, що виходить із системи газифікації біомаси, забруднений смолами, лужними металами, твердими частинками, азотом (N_2), сіркою (S) та хлором (Cl). Згідно з проведеними дослідженнями, донедавна при газифікації біомаси питання очищення газу були найскладнішими [13]. Для розв'язання цієї проблеми було розроблено різні типи газифікаторів із висхідною та низхідною тягою, а також досліджено низку фізичних і каталітичних методів відокремлення смол. Однак для комерційних цілей найбільш ефективний і популярний метод ще належить розробити. Насправді, ефективні методи газифікації та очищення газу дають змогу отримувати високоякісний газ в ідеальному випадку без смол [14], що знижує загальне споживання біомаси, і в підсумку зменшуються проблеми з логістикою та попередньою обробкою біомаси.

У процесах газифікації використовується також плазма, причому двома різними способами: 1-й — як джерело тепла; 2-й — для крекінгу смол після стандартної газифікації. Плазмову газифікацію насамперед використовують для переробки токсичних органічних відходів, твердих побутових відходів, а також гуми та пластмас. Плазмова технологія також викликала інтерес для виробництва синтез-газу й вироблення електроенергії та увійшла в комерційно конкурентоспроможний діапазон. Основними перевагами плазмової газифікації є вихід синтез-газу з високим вмістом H_2 і CO , підвищеним вмістом тепла, низьким виходом CO_2 і низьким вмістом смоли [15–19]. Головними обмеженнями є високі капітальні та експлуатаційні витрати через велике споживання електроенергії для генерації плазми, що призводить до

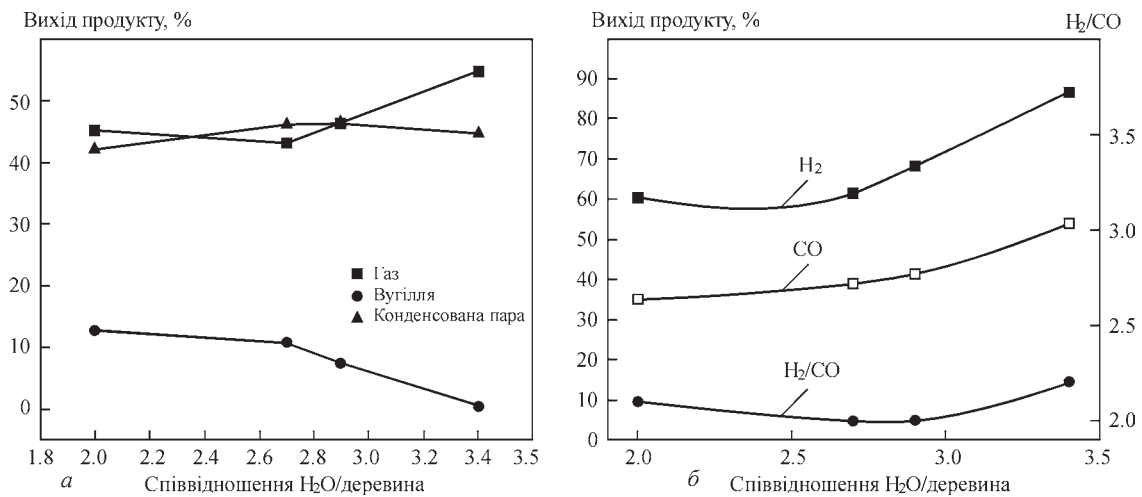


Рис. 1. Вплив співвідношення H₂O та деревини на вихід продукту: а — загальний масовий вихід; б — вихід газів H₂ і СО та співвідношення H₂/СО

низької загальної ефективності. Наприклад, базовий сценарій з установкою з переробки відходів продуктивністю 680 тонн на день, що підійде для невеликого міста або регіонального підприємства, обійдеться в £ 97 мільйонів, що майже втричі перевищує вартість інших установок з переробки відходів (наприклад, інсинераторів).

Показовими є дослідження роботи [20]. Чотири різних види біомаси — деревна тирса, відходи пластику та мастило, що отримане під час піролізу відпрацьованих шин, були досліджені в електродуговому реакторі постійного струму за потужності факела 100 кВт. Невелику кількість аргону з парами H₂O використовували як плазмоутворювальний газ, а H₂O — як окислювальне середовище. Отримано високоякісний синтез-газ, що містить 90 об. % H₂ і СО для всіх чотирьох видів сировини, вміст смоли був нижчим за чутливість методу аналізу (1 мг/м³). Ці обставини компенсуються вищою потребою в електроенергії. Незважаючи на високий вміст тепла у вихідних газах, зареєстрований для всіх наборів даних, ефективність процесу виявилася низькою через високі витрати електроенергії, що значною мірою є обмежувальним фактором для цієї технології. Моделюванням хімічних процесів та експериментальними дослідженнями [21, 22] встановлено, що синтез-газ з високим вмістом H₂ і СО може бути ефективно отримано з відходів біомаси за допомогою пароводяної плазми. Конверсію деревини в середовищі плазми водяної пари проводили за таких експериментальних умов: витрата деревини 1,2 г/с, витрата пари 2,63...4,48 г/с, потужність плазмотрона 49...56 кВт. У діапазоні співвідношень H₂O/деревина 2,0...3,4 середньомасова температура підтримувалася на рівні T = 2800 К. Деревина була повністю перетворена на газ, рідину

(водяну пару), як показано на рис. 1. За потужності плазмового пальника 56 кВт і співвідношення H₂O/деревина — 3/4 час перебування був достатнім для перетворення деревини на газ, рідину та деревне вугілля. Вихід деревного вугілля в загальній масі продуктів реакції знизився до 0,5 %, а вихід газу збільшився до 55 %, що забезпечує ефективність конверсії вуглецю до 97,5 %.

З рис. 1, а випливає, що складовою масового балансу є конденсована вода, яка не повністю прореагувала та використовувалася як плазмоутворюючий газ. Таким чином, потрібна оптимальна організація процесу конверсії. Кількість деревного вугілля в масовому балансі продуктів реакції знижується до 0,5 %, що свідчить про великий потенціал термоплазмової технології для ефективної обробки органічних матеріалів. З іншого боку, низький вихід монооксиду вуглецю вимагає зробити процес конверсії більш селективним. Тому для зменшення кількості монооксиду вуглецю можна використовувати спеціальні каталізатори. З огляду на включення водневої енергетики до енергетичного балансу та порівняння методів перетворення біомаси на водень з точки зору вартості енергоспоживання в кВт·год за кг, техніко-економічних обмежень, впливу на навколишнє середовище важливого значення набуває підвищення ефективності, рівень розвитку технологій та розробка каталізаторів [23].

Плазму може бути утворено з повітря, O₂, водяної пари, N₂, Ar, CO₂ або суміші цих газів. Таким чином, плазмова газифікація є перспективним джерелом отримання відновлюваної енергії з твердих відходів, а також сприяє досягненню цілей сталого розвитку: доступна й чиста енергія, боротьба зі зміною клімату, запобігання потраплянню відходів на сміттєзвалища та повторне

використання ресурсів, що в сукупності зміцнює концепцію циркулярної економіки. Плазмова газифікація відходів, на відміну від звичайного спалювання, надійно знищує високотоксичні діоксини, бензопірен і фурані. Висока температура руйнує всі смоли, деревне вугілля та діоксини, внаслідок чого виходить чистіший синтез-газ, ніж за звичайної газифікації. Слід зазначити, що плазмова газифікація — новітня технологія серед сучасних методів утилізації відходів. Для розвитку традиційної газифікації було виконано багато роботи. За даними Ради з газифікації та сингазних технологій, наразі у світі діють 272 газифікаційні установки з 686 газифікаторами, і ще 74 установки з 238 газифікаторами перебувають у стадії будівництва. Більшість із них використовують вугілля як сировину. Тільки п'ять комерційних установок плазмової газифікації використовуються у світі для переробки відходів [24]. Зусилля розробників останніх років у сфері плазмової газифікації спрямовані на підвищення ефективності процесу, поліпшення екологічних та економічних показників завдяки розробленню передових систем перетворювачів, газоочищення, каталізаторів, систем моніторингу та управління, модульних конструкцій установок, поліпшених матеріалів і альтернативних джерел енергії. Плазмова газифікація стає реально перспективною технологією для утилізації відходів та отримання енергії.

Нині на сайті Ради з газифікації зазначається, що діючі плазмові газифікатори є в Японії, Канаді та Індії. Вводиться в експлуатацію новий завод з переробки ТПВ продуктивністю 2000 тонн на добу в Ті-Веллі (Великобританія), який після спорудження стане найбільшим плазмовим газифікатором у світі [25]. Завод Tees Valley One (TV1), побудований недалеко від Біллінгема, перероблятиме попередньо оброблені муніципальні, комерційні та промислові відходи, які постачає компанія Impetus Waste Management, виводячи їх із прилеглого звалища. Названий «найбільшим газифікаційним заводом у світі», він використовуватиме технологію плазмової газифікації, надану канадською компанією Alter NRG, для перетворення відходів на енергію для Національної мережі. Очікується, що він вироблятиме достатньо електроенергії, щоб забезпечити енергією 50 000 будинків. Вартість заводу, дозвіл на будівництво якого було отримано від ради району Стоктон-он-Тіс у 2011 р., оцінюють у 500 мільйонів доларів (320 мільйонів фунтів стерлінгів), його майже повністю фінансує американська компанія Air Products, а в 2010 р. One North East також виділила грант у розмірі 260 тисяч фунтів стерлінгів

[25]. Однак виникли проблеми, пов'язані з проектуванням та експлуатацією. Наприклад, у Південній Кореї також було зроблено кілька спроб комерціалізувати технологію плазмової утилізації відходів, але жодна з них поки що не досягла стадії комерціалізації. Проте це не зупиняє розвиток. Кореїнський інститут термоядерної енергетики, Hyundai Heavy Industries Power System Co., Ltd. і GS Engineering & Construction Co., Ltd. підписали угоду на розробку комерційної печі плазмової газифікації [26]. Відповідно до угоди три організації планують тісно співпрацювати в розробці технологій, дослідженнях і проектуванні систем плазмової газифікації, розробці та виробництві комерційного обладнання, а також розробці та впровадженню бізнесу для комерціалізації технології плазмової газифікації. Заплановано розробку та будівництво комерційного реактора, здатного вмщати 100 т відходів на день із плазмотроном потужністю 500 кВт, ґрунтуючись на своєму досвіді у виробництві промислових котлів із циркуляційним киплячим шаром.

Слід зазначити, що наразі не існує жодної установки комерційного виробництва H_2 з використанням технології плазмової газифікації біомаси. Необхідні значні дослідження для зниження енерговитрат і тим самим підвищення ефективності.

Загалом технологія виробництва водню шляхом газифікації біомаси ще не досягла високого рівня технологічної зрілості. Основна новизна цієї роботи полягає в оцінці сучасного стану технологій отримання H_2 з твердої біомаси з урахуванням технологічних, економічних та екологічних показників, а також технічного потенціалу виробництва водню шляхом плазмової газифікації біомаси. Згідно з оглядом літератури, нормовані витрати на виробництво водню можуть досягати в середньому 3,15 доларів США/кг H_2 , а середній вихід становить 0,1 кг H_2 /кг біомаси [27]. Водночас економічна доцільність отримання водню з біомаси може бути ускладнена високою вартістю, яка становить 1,21...2,42 \$/кг для газифікації та 1,21...2,19 \$/кг для піролізу. Збільшення виходу водню та вивчення методів зниження температури мають вирішальне значення для підвищення економічної життєздатності та стійкості газифікації біомаси для виробництва водню з особливою увагою до економії енергії [23].

Згідно з глобальним прогнозом з виробництва водню до 2050 р. [28] зелений водень на основі електроенергії, вироблений шляхом розщеплення води за допомогою електролізерів, передбачається домінуючою формою виробництва до середини століття. На його частку очікується 72 % вироб-

ництва. Для такого сценарію потрібен надлишок відновлюваної енергії для живлення електролізерів потужністю 3100 гігават. Це більш ніж удвічі перевищує загальну встановлену потужність сонячної та вітрової генерації на сьогодні. Благитний водень, вироблений із природного газу з уловлюванням викидів, відіграє велику роль у короткостроковій перспективі (близько 30 % від загального обсягу виробництва у 2030 р.), але його конкурентоспроможність буде знижуватися в міру збільшення потужностей відновлюваних джерел енергії та зниження цін. Проблема полягає в тому, щоб зробити водневі проєкти конкурентоспроможними та економічно вигідними на базі надлишку відновлюваної сонячної, вітрової енергії для живлення електролізерів, поки що залишається складною.

Риформінг природного газу, газифікація вугілля та електроліз води є перевіреними технологіями для виробництва водню сьогодні й застосовуються в промислових масштабах по всьому світу. Паровий риформінг природного газу є найчастіше використовуваним процесом у хімічній і нафтохімічній промисловості. Нині це найдешевший метод виробництва та має найнижчі викиди CO₂ серед усіх способів видобутку викопного палива. Електроліз води — це дорогий процес і його застосовують тільки в тому разі, якщо потрібен водень високої чистоти. При передбачуваному зростанні цін на природний газ і вугілля процес газифікації очікується найекономічнішим варіантом приблизно з 2030 р. Газифікація біомаси для отримання водню сьогодні все ще перебуває на ранній стадії, але, найімовірніше, стане найдешевшим варіантом поставок поновлюваного водню в майбутніх десятиліттях. Наразі газифікація біомаси застосовується на невеликих децентралізованих заводах на ранній стадії розгортання інфраструктури. Загалом структура виробництва водню дуже чутлива до специфіки країни і сильно залежить від передбачуваних цін на сировину; наявності ресурсів і політичної підтримки, яка також відіграє важливу роль, особливо для водню з відновлюваних джерел енергії та атомної енергії. Відновлюваний водень здебільшого є економічно вигідним варіантом у країнах із великою базою відновлювальних ресурсів та/або нестачею викопних ресурсів, для віддалених і малонаселених районів (наприклад, островів) або для зберігання надлишків електроенергії від нестабільних відновлювальних джерел енергії. В іншому разі відновлюваний водень має бути стимульованим або обов'язковим.

Очевидно, що в довгостроковій перспективі водень має вироблятися на основі процесів, які

дозволяють уникнути або мінімізувати викиди CO₂. Відновлюваний водень, одержуваний шляхом електролізу з енергії вітру чи сонця або з біомаси — це, безумовно, є кінцевою перспективою (особливо з погляду пом'якшення наслідків зміни клімату), але не є необхідною умовою для впровадження водню як енергетичного вектора. Поки ця мета не буде досягнута, водень, одержуваний з викопного палива, буде переважати, але вловлювання й зберігання CO₂, що утворюється, стає обов'язковою умовою для того, щоб водень сприяв загальному скороченню викидів CO₂ у транспортному секторі. Очікується переважання викопного водню в період приблизно до 2030 р., що відображено в різних водневих дорожніх картах, як і подальша роль поновлюваних джерел енергії. За винятком біомаси, питомі витрати на виробництво водню з відновлюваних джерел енергії не вважаються конкурентоспроможними порівняно з більшістю інших варіантів у цей період. Вартість виробництва водню значною мірою залежить від передбачуваних цін на сировину. Типовий діапазон цін до 2030 р. становить 8...12 центів/кВт·год (2,6...4,0 \$/кг). У довгостроковій перспективі до 2050 р., за очікуваного зростання цін на сировину (викопне паливо) і цін на викиди CO₂, витрати на виробництво водню також зростатимуть [29].

Виходячи з вищевикладеного, біомаса забезпечує відновлювану та стійку енергію в інших формах, таких як синтез-газ, біогаз та водень. Воднева енергетика має великий потенціал для декарбонізації різних секторів завдяки своїй універсальності. При цьому виробництво водневої енергії вважається екологічно чистим. Однак, незважаючи на те, що основні прекурсори для виробництва газоподібного водню легкодоступні в різних країнах, ці ресурси ще не використовуються, і, як наслідок, газоподібний водень не включено до енергобалансу держав [23].

Таким чином, сьогодні водень виробляють переважно з викопного палива (рис. 2) [30]. Вироб-

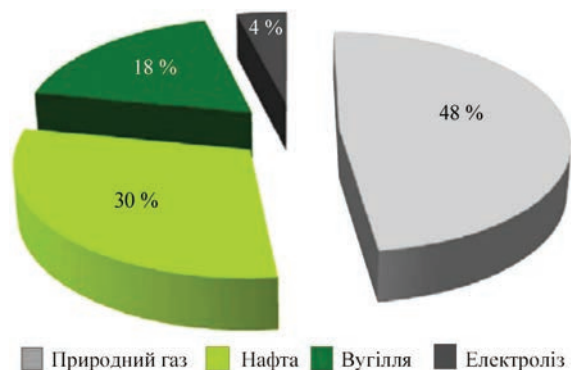


Рис. 2. Поточна сировина, що використовується для виробництва H₂ [30]

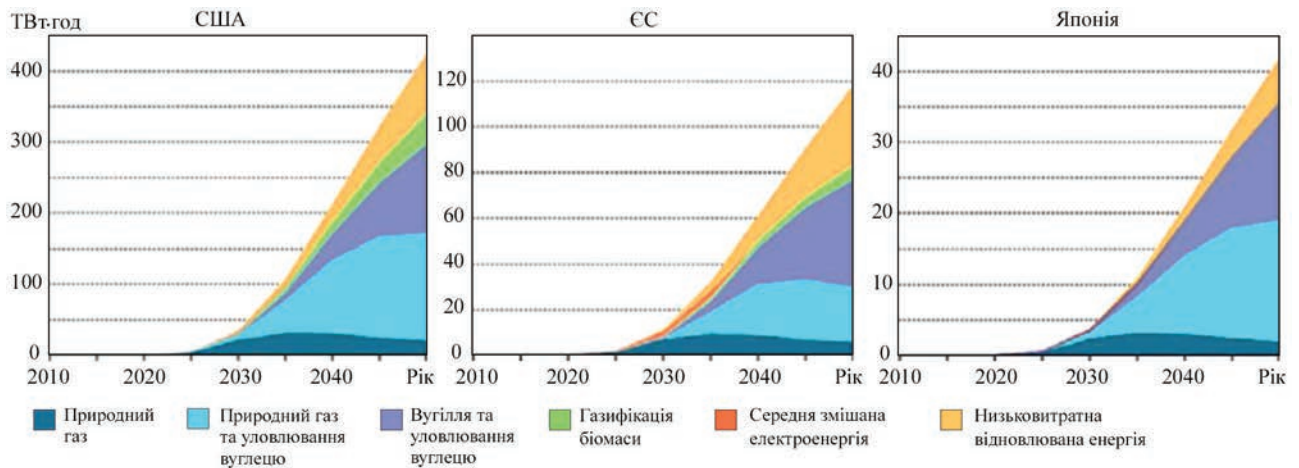


Рис. 3. Тенденції постачання водню [33]

ництво водню з біомаси шляхом газифікації може стати сприятливою альтернативою для майбутніх декарбонізованих застосувань, що ґрунтуються на відновлюваному та нейтральному по відношенню до діоксиду вуглецю водні.

Водночас слід зазначити, що на частку біомаси припадає близько 14 % від світового споживання енергії, що вище, ніж у вугілля (12 %), і можна порівняти з часткою газу (15 %) та електроенергії (14 %). Біомаса є основним джерелом енергії для багатьох країн, що розвиваються, але більша її частина некомерційна [31, 32].

Рис. 3 демонструє майбутню тенденцію поставок водню для трьох розвинених країн/регіонів — США, ЄС і Японії. Як бачимо, постачання водню значною мірою залежатиме від викопних джерел — природного газу та вугілля. Технології уловлювання та секвестрації вуглецю, як планується, відіграватимуть важливу роль у досягненні кліматичних цілей. Однак кількість водню, одержуваного з відновлюваних джерел, також має значно збільшитися. Стає зрозуміло, що поставки водню залежать від регіональних відмінностей у забезпеченості ресурсами. У той час як Японія включає відновлювану електроенергію тільки як

джерело відновлюваного водню, а ЄС і США планують збільшити виробництво водню шляхом газифікації біомаси [33].

Огляди сучасних можливих принципів промислового виробництва водню на основі газифікації біомаси представлено в численних роботах. Загалом водень із відновлюваних джерел може бути отриманий електрохімічним, біохімічним і термохімічним шляхом. Усі три способи дають змогу виробляти водень без викидів CO₂ (рис. 4). H₂@Scale — це ініціатива Міністерства енергетики США (DOE), яка об’єднує зацікавлені сторони для просування доступного водню, можливості отримання доходу в різних секторах енергетики. Вона охоплює проекти, що фінансуються Міністерством енергетики США, і заходи, які спільно фінансуються національними лабораторіями та промисловістю, для прискорення досліджень на ранніх стадіях розроблення та демонстрації водневих технологій.

У цьому дослідженні основна увага приділяється термохімічному підходу через газифікацію біомаси (деревної тріски, відходів сільського господарства). А саме, розглядається можливе промислове виробництво водню з упором на технології плазмової газифікації. На рис. 5 показано



Рис. 4. Бачення H₂@Scale отримання водню, у тому числі з відновлюваних джерел, та його використання



Рис. 5. Загальна технологічна схема виробництва водню шляхом плазмової газифікації

загальну схему процесу виробництва водню шляхом плазмової газифікації.

У схему включено очищення та збагачення газу, які необхідні для видалення CO і CO_2 , а також таких слідових компонентів, як H_2S , HCl і легкої золи.

Існує низка відмінностей між характеристиками біомаси. Тверде паливо з біомаси, яке зазвичай використовують на великих електростанціях, включає сільськогосподарські відходи, енергетичні культури з короткою ротацією тощо. У їхньому складі помітно різняться пропорції легких речовин і фіксованого вуглецю. Більшість лігноцелюлозної біомаси (наприклад, деревні та трав'янисті матеріали) мають близько 75...85 % легких речовин і близько 15...17 % фіксованого вуглецю. За фізичними характеристиками, густиною та тепловими властивостями, біомаси значно різняться. Густина коливається в межах 200...300 кг/м^3 . Теплопровідність для частинок біомаси — від 0,05 $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ для деяких трав'янистих матеріалів і від 0,1 і 0,15 $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ для деревних матеріалів [34]. Майбутня промислова система газифікації, ймовірно, використовуватиме широкий спектр доступних ресурсів біомаси. Тому під час проєктування необхідно буде враховувати змінюваність характеристик згоряння палива. Для забезпечення оптимальної ефективності необхідно керувати розміром частинок, прогнозувати поведінку неорганічних компонентів у реакторі, зокрема, ролі калію, що необхідно для ефективного управління обростанням і відкладенням золи тощо.

Плазмова газифікація містить послідовність фаз втрати маси твердої речовини, що включають сушіння, піроліз (вихід легких речовин), утворення та газифікацію деревного вугілля. Після чого відбувається гомогенне часткове окиснення легких речовин із наближенням до термодинамічної рівноваги та завершення реакції водяного зсуву. Окиснення як легких речовин, так і деревного вугілля відбувається за нестачі O_2 зі швидкістю, пропорційною доступному O_2 і температурі.

Плазмотрон є незалежним джерелом концентрованого тепла, що дає змогу регулювати температуру в реакторі незалежно від коливань якості сировини та подачі повітря/кисню/пари, необхідних для її газифікації. Оптимальні характеристики можуть бути встановлені та легко підтримуватися, і на них не впливає стан оброблюваного матеріалу. Це дає значні переваги в плані варіативності процесу порівняно з газифікацією без зовнішнього джерела тепла. Плазма може бути ефективно використана в кожній фазі процесу, забезпечуючи значне підвищення ефективності в рамках реалізації стратегії перетворення сировини в задані продукти газифікації. Однак переважне місце її використання впливає з логіки процесу.

Покажемо для оцінок є термічний аналіз втрати ваги, проведений для п'яти видів пелетного палива з біомаси, швидкість нагріву яких становить 20 $^{\circ}\text{C/хв}$. Були отримані криві: термогравіметрична крива нагріву зразка — ТГ (рис. 6, а) і похідна термогравіметрична крива — ДТГ (рис. 6, б) [35].

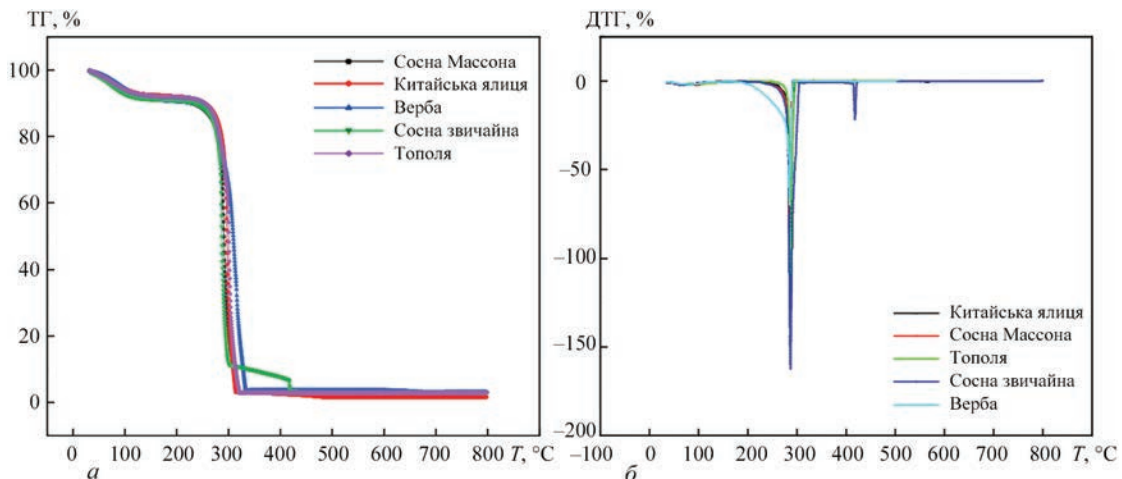


Рис. 6. Термічний аналіз втрати ваги палива з біомаси (проведено для п'яти видів пелетного палива з біомаси): а — ТГ криві; б — ДТГ криві [35]

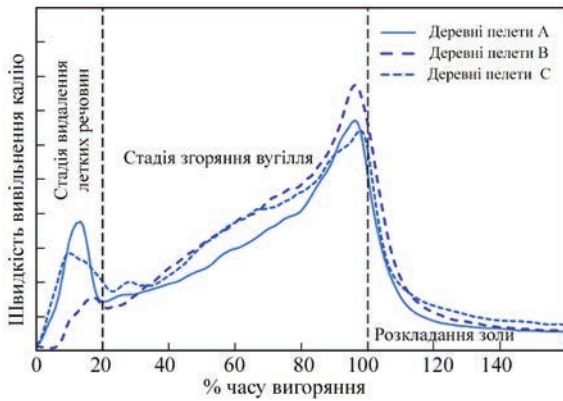


Рис. 7. Часові залежності вигорання трьох видів деревних пелет (А, В, С) з виділенням калію та зазначенням стадій газифікації [38]

З рис. 6 видно, що піроліз п'яти видів пелетного палива з біомаси здебільшого включає в себе три стадії: перша — стадія випаровування води; друга — стадія виходу легких речовин; третя — стадія окиснення фіксованого вуглецю. На першій стадії сушіння, від кімнатної температури до приблизно 170 °С, пікова температура втрати ваги відбувається за 100 °С, і втрата ваги на цій стадії становить близько 10 %. Під час процесу нагрівання пелети поглинають тепло для випаровування води (вільної, кристалічної, абсорбованої тощо). Це етап сушіння п'яти видів пелетного палива з біомаси, і при цьому його склад істотно не змінюється. Другий етап — вихід легких речовин за температури приблизно від 190...450 °С. Це стадія основної втрати ваги п'яти видів пелетного палива з біомаси та утворення початкового вуглецевого шару. Основними хімічними компонентами в п'яти видах пелетного палива з біомаси є целюлоза, геміцелюлоза, лігнін тощо. Втрата ваги на цій стадії становить близько 75 %. Третя стадія — після 450 °С, на якій відбувається повільне окиснення та розкладання вуглецевого шару. Втрата ваги на цій стадії становить близько 10 %. Піроліз органічної речовини в п'яти видах палива з гранул біомаси в основному завершено. Залишаються залишкова зола та інші нерозкладні речовини. Результати газифікації п'яти видів пелетного палива з біомаси приблизно однакові.

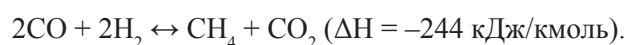
Для оптимізації процесу за продуктивністю та повнотою протікання реакцій важливим є визначення характеристик палива з точки зору вимірної тривалості різних етапів газифікації. Такі корисні дані для прогнозування поведінки при втраті маси для різних розмірів частинок дозволять інформувати операторів щодо необхідності корегування вимог до подрібнення та температурного режиму. У роботі [36] наведено експериментальний метод дослідження тривалості різних стадій

згорання окремих частинок стосовно трьох видів палива з деревної біомаси. Обсяг отриманих даних дає змогу оцінити емпіричні залежності між масою частинок і тривалістю виходу легких речовин, а також горіння деревного вугілля.

Температура згорання біомаси на великих електростанціях сягає до 1600 К. Такі температури впливають на розділення неорганічних компонентів за допомогою фазових перетворень. Зокрема калій у паливі з біомаси може бути присутнім у різних видах і переходить у газову фазу під час згорання за таких підвищених температур. Згодом продукти згорання охолоджуються та конденсуються на поверхні печі й теплообмінників. А хлорид і гідроксид калію призводять до збільшення корозійних відкладень і налипання золи. Калій у газовій фазі також може призводити до утворення сульфатних аерозолів і повторно з'єднуватися з іншими твердофазними компонентами золи, впливаючи на поведінку золи під час плавлення і, отже, впливаючи на утворення нагару та шлаку в печі [37]. Картину вивільнення калію, отриману в експериментах під час вигорання різних видів палива з деревних гранул, показано на рис. 7 [38]. Ці дані дають змогу простежити фізичні механізми процесу та сприяють розробленню моделей газифікації частинок біомаси.

Як впливає з рис. 6, 7, лімітуючою стадією газифікації біомаси є газифікація вуглецевого шару. Оскільки автори розвивають тему генерування плазмової суміші водяної пари та кисню при атмосферного тиску з використанням безелектродного розряду для переробки біомаси з отриманням водню [39], то основну увагу слід приділити газифікації вуглецевого шару.

Для отримання збагаченого воднем синтез-газу переважними газифікуючими агентами є кисень і водяна пара [40]. Одним із ключових чинників, що впливають на продуктивність процесу, є співвідношення пари та кисню на вході в реактор. Як лабораторні, так і дані промислових тестів показують, що вище співвідношення пари та кисню також збільшує швидкість реакції зсуву водяного газу. У результаті впливу співвідношення пари та кисню на термодинамічні й кінетичні властивості процесу вищі значення дають вищу конверсію СО і менший вміст СО в газі на виході. Крім конверсії СО, співвідношення пари та кисню може також впливати на виробництво вуглеводнів (переважно метану) внаслідок реакції:



Для того щоб звести до мінімуму такі небажані реакції, слід забезпечити мінімальне співвідно-

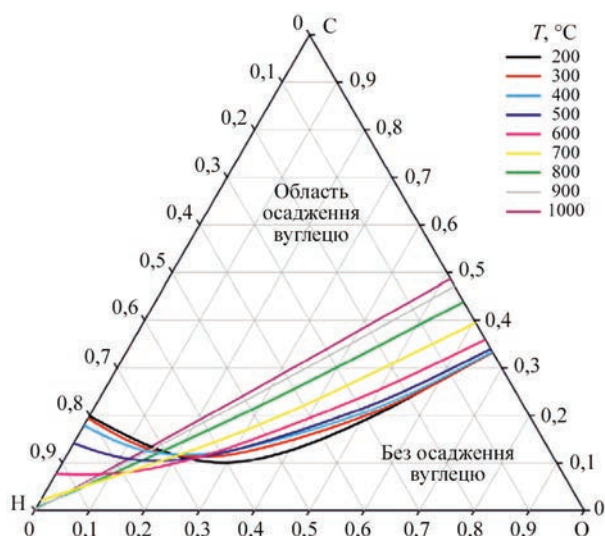
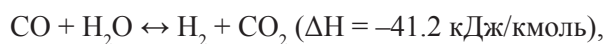


Рис. 8. Потрійна C–N–O–діаграма для твердої фази всіх алотропів вуглецю при тиску 1 бар [41]

шення пари і кисню ~ 0,4 на вході в реактор. Крім того, певна кількість пари запобігає ризику коксування та відкладення вуглецю на поверхні. Залежно від подачі сировини в реактор, типове молярне співвідношення пари до кисню становить 0,6...2,2, а співвідношення пари до вуглецю — 2,8...4,2. На рис. 8 [41] показано потрібну C–N–O–діаграму для тиску 1 бар, що вказує на зону з термодинамічною перевагою коксування та осадження вуглецю.

З метою збільшення виходу H₂ і зниження вмісту CO в синтез-газі, що генерується, реакція водяного зсуву:



є технологією, що добре зарекомендувала себе в промислових великотоннажних установках, які виробляють водень або встановлюють співвідношення CO/H₂ синтез-газу.

Реакція водяного зсуву перетворює окис вуглецю та пару на водень і вуглекислий газ. Константа рівноваги зменшується з температурою, тому ви-

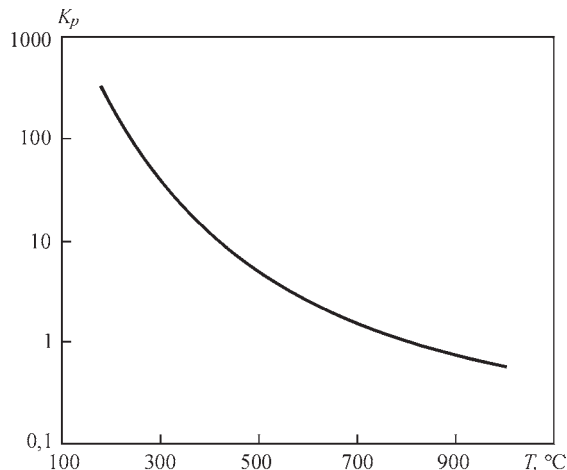


Рис. 9. Зміна константи рівноваги (K_p) для реакції зсуву водних газів у залежності від температури [42]

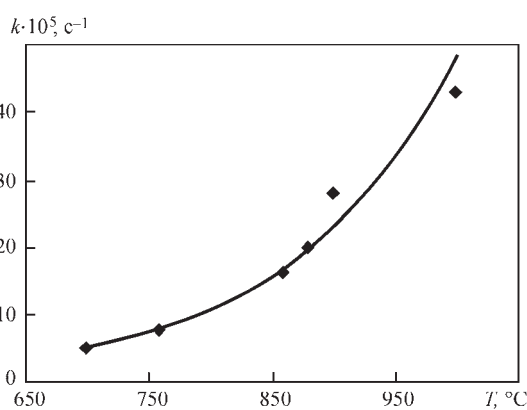


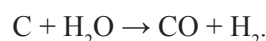
Рис. 10. Вплив температури в шарі сировини на швидкість конверсії вуглецю [43]

соким конверсіям сприяють низькі температури, як показано на рис. 9 [42].

При використанні перегрітої водяної пари як теплоносія та реагенту для конверсії вуглецю зі збільшенням його температури швидкість конверсії збільшується (рис. 10) [43].

Це цілком узгоджується з уявленнями про термічну активацію хімічних процесів — зі збільшенням температури їхня швидкість збільшується, а збільшення температури забезпечується збільшенням температури водяної пари, тобто зі збільшенням температури пари зростають швидкість конверсії та глибина протікання реакцій. На рис. 11 [43] наведено характерні результати дослідження кінетики газовиділення в процесі газифікації карбонізованого вугілля.

Основний процес взаємодії вуглецю з водяною парою:



При розгляді залежностей на рис. 11 звертає на себе увагу наступне. У процесі газифікації відбувається зниження концентрації водню за одночасного збільшення вмісту в суміші кисню. При цьому співвідношення концентрацій CO і CO₂

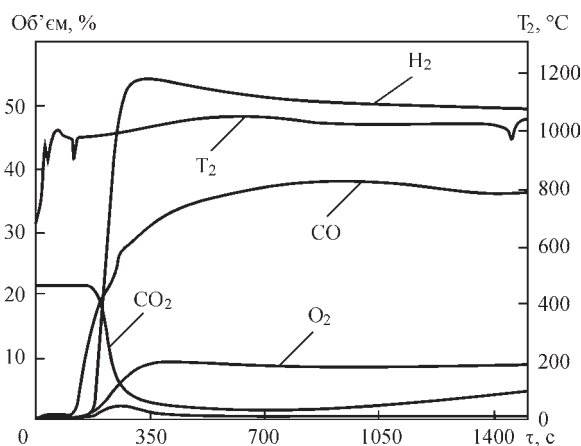
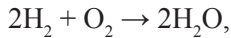


Рис. 11. Залежності виходу газоподібних продуктів газифікації вугілля від часу

практично не змінюється протягом усього процесу. Зменшення кількості водню в продуктах реакції відбувається внаслідок окиснення його киснем за реакцією:



і при цьому використовується кисень, одержуваний за реакцією $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$. Власне ж ця реакція стає можливою, з одного боку, завдяки окисненню CO , перегрітою водяною парою $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$, з іншого, за наявності у вугіллі мінеральних домішок, що мають каталітичну активність щодо реакції $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$ [44].

Виходячи з вищевикладеної оцінки стану питання газифікації біомаси у великих об'ємах, проєкція на плазмові технології сьогодні виглядає наступним чином. Протягом десятиліть плазма була визнана ефективним методом знищення небезпечних відходів. Проте генератори плазми споживають багато електроенергії. У результаті зростаюча вартість електроенергії та забруднення навколишнього середовища від вугільних електростанцій зробили плазму дорогим і екологічно сумнівним методом утилізації. До 2000 р. більша частина досліджень у сфері застосування плазми для переробки відходів була спрямована на досягнення — наскільки це можливо — повного піролітичного розкладання. Однак, чим досконаліший процес, тим більша споживана потужність. Навіть за великих обсягів знищених відходів піролітична газифікація потребує набагато більше енергії, ніж виробляє. Тільки коли вартість усунення небезпеки, яку становлять собою відходи, дуже висока, плазма стає економічно вигідним методом знищення відходів [45]. У даний час індустрія термічної обробки уважно вивчає способи аналізу та оптимізації ефективності установок [46, 47]. Проведено аналіз чутливості робочих параметрів процесу плазмової газифікації з метою максимізації чистої виробленої енергії та мінімізації витрат на установку. Для розрахунку капітальних і експлуатаційних витрат процесу використовувалися кореляції з літератури, а також ринкові дані, якщо такі були. Наприклад, у Греції було проведено тематичне дослідження установки плазмової газифікації, яка переробляє 750 т твердих побутових відходів на добу. Результати цього аналізу показали, що вартість процесу плазмової газифікації порівнянна з процесом спалювання, що зазвичай використовується. Крім того, плазмова газифікація дала кращий еколого-технічний результат [46]. Цей факт пропонує нові підстави для перегляду історичних питань вартості та енергоспоживання, які раніше обмежували розвиток плазмового оброблення. Щоб конкурувати з технологіями, заснованими на викопному паливі, великомасштабні установки газифікації все ще потребують значного технологічного розвитку, підтримуваного економічними субсидіями та стимулами, ефективними операційними стратегіями, а також глобальною політикою, що вимагає прийняття вуглецево-нейтральних рішень. У [48] показано, що питомі інвестиції мають тенденцію до зменшення з роками, зокрема для установок газифікації, призначених для виробництва електроенергії, когенераційної енергії та рідкого біопалива (рис. 12).

Незважаючи на те, що плазмова газифікація має безліч переваг, є й недоліки, які необхідно враховувати, перш ніж інвестувати в цю технологію. Одним з основних недоліків плазмової газифікації є висока вартість. Цей процес вимагає коштовного обладнання та навченого персоналу, що може зробити його непомірно дорогим для багатьох приватних осіб та організацій. Крім того, висока вартість плазмової газифікації може ускладнити виправдання витрат, особливо коли доступні дешевші методи. Ще одним недоліком плазмової газифікації є те, що вона потребує спеціалізованої підготовки. Особи, які бажають виконати цю процедуру, повинні пройти глибоке навчання, щоб навчитися безпечно й ефективно працювати зі спеціальним обладнанням. Але загалом плазмова газифікація пропонує багатообіцяюче рішення для зниження залежності від традиційних методів управління відходами й водночас допомагає їм стати більш екологічними. Як і будь-яка інша технологія або процес, у цього методу є як переваги, так і недоліки, які необхідно враховувати. Перед тими, хто збирається використовувати плазму для переробки відходів, стоїть завдання домогтися низького енергоспоживання, високої енергетичної цінності газу, низьких капітальних і експлуатаційних витрат і тривалого часу роботи обладнання.

Виходячи з вищевикладеної оцінки стану питання газифікації біомаси у великих об'ємах, проєкція на плазмові технології сьогодні виглядає наступним чином. Протягом десятиліть плазма була визнана ефективним методом знищення небезпечних відходів. Проте генератори плазми споживають багато електроенергії. У результаті зростаюча вартість електроенергії та забруднення навколишнього середовища від вугільних електростанцій зробили плазму дорогим і екологічно сумнівним методом утилізації. До 2000 р. більша частина досліджень у сфері застосування плазми для переробки відходів була спрямована на досягнення — наскільки це можливо — повного піролітичного розкладання. Однак, чим досконаліший процес, тим більша споживана потужність. Навіть за великих обсягів знищених відходів піролітична газифікація потребує набагато більше енергії, ніж виробляє. Тільки коли вартість усунення небезпеки, яку становлять собою відходи, дуже висока, плазма стає економічно вигідним методом знищення відходів [45]. У даний час індустрія термічної обробки уважно вивчає способи аналізу та оптимізації ефективності установок [46, 47]. Проведено аналіз чутливості робочих параметрів процесу плазмової газифікації з метою максимізації чистої виробленої енергії та мінімізації витрат на установку. Для розрахунку капітальних і експлуатаційних витрат процесу використовувалися кореляції з літератури, а також ринкові дані, якщо такі були. Наприклад, у Греції було проведено тематичне дослідження установки плазмової газифікації, яка переробляє 750 т твердих побутових відходів на добу. Результати цього аналізу показали, що вартість процесу плазмової газифікації порівнянна з процесом спалювання, що зазвичай використовується. Крім того, плазмова газифікація дала кращий еколого-технічний результат [46]. Цей факт пропонує нові підстави для перегляду історичних питань вартості та енергоспоживання, які раніше обмежували розвиток плазмового оброблення. Щоб конкурувати з технологіями, заснованими на викопному паливі, великомасштабні установки газифікації все ще потребують значного технологічного розвитку, підтримуваного економічними субсидіями та стимулами, ефективними операційними стратегіями, а також глобальною політикою, що вимагає прийняття вуглецево-нейтральних рішень. У [48] показано, що питомі інвестиції мають тенденцію до зменшення з роками, зокрема для установок газифікації, призначених для виробництва електроенергії, когенераційної енергії та рідкого біопалива (рис. 12).

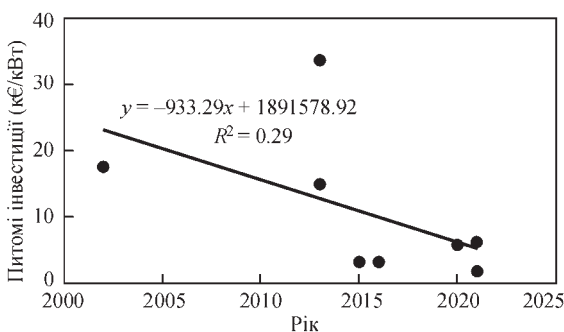


Рис. 12. Інвестиції за роками, а також відповідне лінійне рівняння регресії для електроенергії, когенераційних установок і установок газифікації біопалива [48]

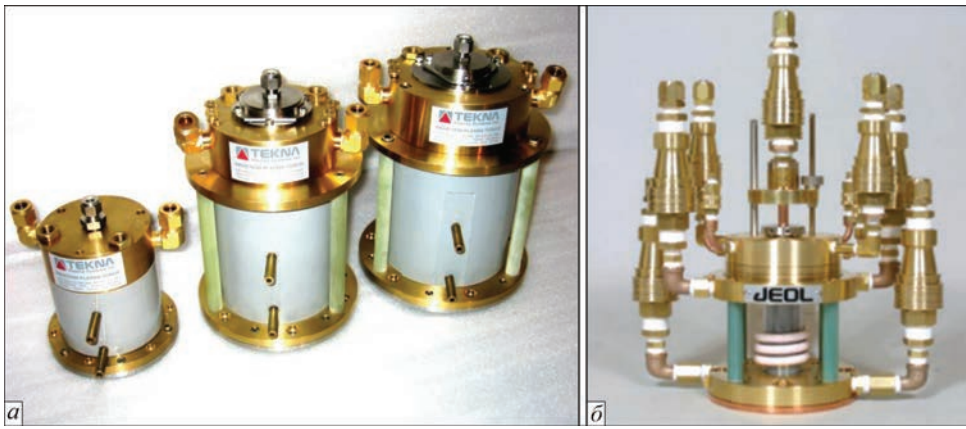


Рис. 13. Високочастотні індукційні плазмотрони: *a* — Tekna (40...200 кВт); *б* — JEOL

Щодо виконання вимоги до тривалого часу роботи наразі розглядаються можливості використання мікрохвильової [49] та індукційної плазми [50]. Поява нових плазмових технологій у методах термохімічної конверсії може запропонувати нові шляхи до економічного виробництва H_2 і продуктів з доданою вартістю. Плазмова газифікація досі розроблялася на комерційній основі, як правило, з використанням технології плазмового розряду постійного струму [51]. Проте пальники постійного струму мають короткий термін служби електродів у присутності окислювальних газів, що призводить до незручностей та високих експлуатаційних витрат, пов'язаних з їх заміною. Альтернативою є використання безелектродних плазмотронів.

Для переробки відходів у невеликих і промислових масштабах розглядаються три різні типи передових технологій термічної плазми, такі як атмосферні плазмотрони постійного струму, радіочастотні та мікрохвильові плазмотрони. Авторами роботи [52] було проведено порівняльне дослідження всіх трьох плазмових пальників для використання в енергетиці та переробці відходів. Було наведено імітаційне моделювання та експериментальні результати з плазмотроном постійного струму непрямої дії та високочастотним індукційним плазмотроном. Результати засвідчують, що плазмотрони постійного струму та високочастотні індукційні плазмотрони економічні й вигідні для великомасштабного перероблення відходів та отримання енергії. Водночас при переробці відходів у невеликих масштабах можна використовувати мікрохвильовий плазмовий пальник. Загалом мінімізація впливу на навколишнє середовище та економічність процесу є найважливішими параметрами для підвищення доцільності та стійкості використання установок з переробки відходів при використанні плазми.

Високочастотні індукційні плазмотрони з потужністю в плазмі 15...200 кВт розраховані на

більш ніж 10 000 год безупинної роботи [53]. Вони застосовуються в хімічній і металургійній промисловості завдяки високій надійності та тривалому терміну роботи без заміни деталей (протягом 2–3 місяців).

Сучасні високочастотні індукційні плазмотрони компаній TEKNA [54] і JEOL [55] (рис. 13) досягли високого рівня досконалості та задовольняють вимогам для системи плазмової газифікації.

Для адекватного управління процесами газифікації, розроблення та оптимізації плазмових реакторів необхідно мати достовірну інформацію про ВЧ розряд і параметри плазмового факела. При газифікації біомаси завдання спрощується, оскільки струменевий індукційний плазмотрон працює тривалий час на одному режимі. Протяжний ламінарний факел оптимізованого індукційного плазмотрона має добре заповнені профілі температур і швидкостей (рис. 14) [56]. Слід зазначити, що було проведено безліч досліджень, присвячених температурі та швидкості струменя індукційних плазмотронів шляхом прямих вимірів, за допомогою зондів і оптичних емісійних спектрів. Для наочності тут наведено розрахункову картину температурних і швидкісних полів у факелі індукційного плазмотрона, яка узгоджується з експериментальними даними.

Факел змодельовано в ANSYS Fluent, геометрія була об'єднана в сітку для дискретизації простору. Дослідження незалежності сітки проводилося шляхом уточнення розміру комірки, яка відображається як кількість комірок на міліметр осьової відстані.

Високочастотні індукційні (ВЧІ) плазмотрони використовуються в промисловості для широкого спектра застосувань. Щоб отримати більше користі, було зроблено безліч спроб поліпшити індукційний плазмотрон, що включало в себе оптимізацію умов його експлуатації, розміру та форми. Однак зроблені спроби [57–59] щодо оптимізації

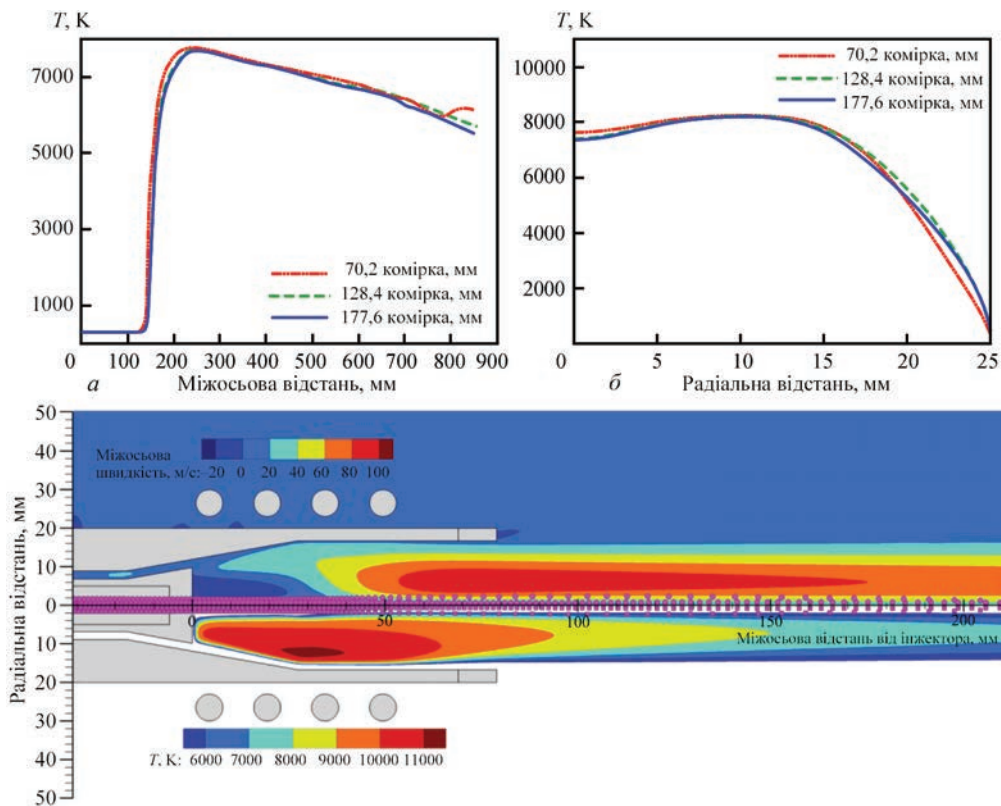


Рис. 14. Розподіл параметрів у факелі звичайного високочастотного індукційного плазмотрона: *a* — температура вздовж центральної осі для різних розмірів комірок; *б* — радіальний розподіл температури на виході плазмотрона для комірок різних розмірів; *в* — контури осьової швидкості та температури

не давали довготривалих результатів, залишивши первісний дизайн, запропонований Рідом [60] у 1960-х роках, який практично не змінився. Проте недавні зусилля [61] відродилися та розвинулися в [56]. Істотне поліпшення досягається за рахунок використання конічної геометрії (рис. 13, б). Було встановлено, що така геометрія призвела до значного зниження споживання газу й електроенергії та поліпшення характеристик. Наведені на рис. 13 спеціальні ВЧ-плазмотрони доступні для роботи з кожним класом ВЧ джерел електроживлення. Вони мають високоефективну конструкцію для отримання максимального ефекту термічного плазмового оброблення, чудову міцність і стабільність. Використовується двотрубна система водяного охолодження: внутрішня трубка виготовлена з кераміки з вищою міцністю, ніж кварцова трубка, що забезпечує стабільну роботу протягом тривалого часу за атмосферного тиску в умовах надвисоких температур і середовищ з високим ступенем окиснення, таких як HCl, HF або HBr.

У перші роки дослідження ВЧ плазми експериментатори користувалися доступними джерелами електроживлення (ламповими генераторами), і перші результати були отримані в широкому діапазоні частот 0,5...60 МГц. Пізніше було встановлено стандартний ряд частот 0,44; 1,76; 5,28 МГц і коливальних потужностей лампових генераторів

60, 160, 1000 кВт [62]. Найважливіший споживач енергії — це генераторна лампа. Втрати енергії на аноді генераторної лампи складають 25...33 % від усієї споживаної електроенергії, саме ця обставина визначає всю енергетику ВЧ плазмових установок. Оптимальною частотою для ВЧ-плазмотронів вважається 5,28 МГц і вище, втрати в металевому плазмотроні становлять 1,3 % від споживаної потужності. Частота 1,76 МГц з точки зору використання металевого плазмотрона вважається граничною, нижче за яку спускатися не слід — втрати становлять уже 4...6 %. На частоті 0,44 МГц втрати в плазмотроні, індукторі та контурах сумарно стають рівними втратам у генераторній лампі. Загальний ККД ВЧ плазмової установки на генераторній лампі на частоті 1,76...5,28 МГц становить 60...64 %.

Високочастотні індукційні плазмотрони, які дійсно можуть стати основною ланкою технологічного процесу в даний час, з потужністю плазми 15...200 кВт, розраховані на більш ніж 10000 годин неперервної роботи. Стратегія полягає в тому, щоб об'єднати газифікацію та максимальне очищення газу в одному реакторі для отримання високої якості та теплоти згоряння синтез-газу. Рекуперація енергії та поєднання первинного очищення з газифікацією роблять систему більш компактною, зменшують втрати тепла та займають менше місця

на виробництві. Підвищення чистоти газу, що виходить із системи газифікації біомаси, виключення смоляних забруднень, максимальне зниження лужних металів, твердих частинок, азоту (N_2), сірки (S) і хлору (Cl) спрощують фільтрацію й очищення з мінімізацією використання каталізаторів і сорбентів.

Нова концепція організації технологічного процесу та будівництва реактора з використанням індукційної плазми забезпечує рівномірний газодинамічний режим по всьому об'єму зони газифікації та ефективну й рівномірну теплову дію на весь об'єм твердого вуглецевмісного матеріалу та газової фази в зоні газифікації, а відтак рівномірний розподіл температури й концентрацій у зоні газифікації. Це сприяє створенню однорідних умов для хімічних реакцій як у твердому вуглецевмісному матеріалі, так і в газовій фазі, а також стабільний склад і високі енергетичні показники отримання синтез-газу з максимальним наближенням до термодинамічної рівноваги [50]. Очікується надрівноважний нагрів поверхні від струменя високоентальпійної дисоційованої газової суміші індукційного плазмотрона [63]. Ефект надрівноважного нагріву спостерігається під час обтікання дисоційованим хімічно нерівноважним газовим потоком, що генерується індукційним плазмотроном, поверхні з неоднорідними каталітичними властивостями. Під час переходу від некаталітичної ділянки поверхні до каталітичної відбувається стрибок теплового потоку та температури до рівнів, що суттєво перевищують значення, які отримано на повністю каталітичній поверхні або у випадку рівноважного пограничного шару. Ефект зумовлений тим, що за однакових зовнішніх умов течії концентрації атомів дисоційованого газу в пограничному шарі на некаталітичній поверхні вищі, ніж у випадку каталітичної поверхні, і їхня рекомбінація далі по потоку на каталітичній поверхні призводить до її додаткового нагрівання. В експериментах зі зразком, ділянки якого були вкриті хромонікелевою шпінеллю, температура за лінією переходу від низько- до висококаталітичної ділянки поверхні перевищувала температуру, виміряну в тій самій ділянці під час обтікання повністю висококаталітичної поверхні, на величину $140\text{ }^\circ\text{C}$ [64]. У дозвукових струменях дисоційованого повітря на плоскій висококаталітичній поверхні реалізовано теплові потоки густиною $150\text{...}3750\text{ кВт/м}^2$. Урахування цього явища є особливо важливим на етапі газифікації твердого вуглецю, змішаного із зольним залишком.

Ключовим питанням при масштабуванні плазмової газифікації біомаси є питома енерговитрати

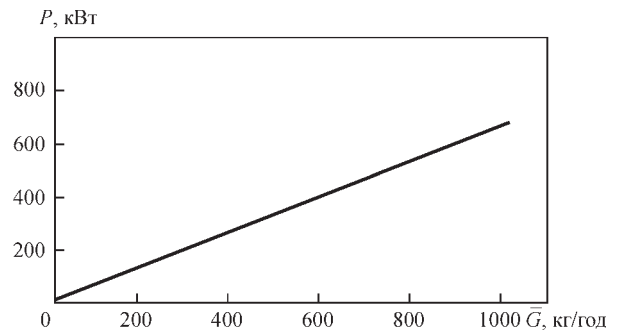


Рис. Взаємозв'язок продуктивності процесу газифікації відходів і потужності стороннього джерела енергії [65]

електроенергії на кілограм відходів. Наведемо низку показових процесів. Розрахунки процесів плазмової газифікації відходів у шахтному реакторі дали змогу оцінити енерговитрати та окреслити шляхи їх зниження [65]. На рис. 15 наведено залежність продуктивності процесу газифікації середньостатистичного складу відходів від потужності стороннього джерела енергії. Теплота згоряння перебувала в межах $7\text{...}10\text{ МДж/кг}$ за масової частки вуглецю і водню у вихідній сировині $20\text{...}30\%$. Для порівняння теплота згоряння біомаси лушпиння соняшника становить $19,4\text{ МДж/кг}$ за масової частки вуглецю та водню 54% . У шахтній плазмовій печі, для якої отримано залежність (рис. 15), в якості окиснювача використовується волога, що визначає вихідну вологість сировини, а плазмотрони можуть працювати з подачею перегрітої пари або повітря, кисень якого є лише додатковим окисником у процесі газифікації. Для обраної схеми печі зі збільшенням температури в реакторі відбувається збільшення витрат електричної енергії, але на таку саму величину зростає потенційна енергія синтез-газу: при збільшенні температури з 1100 до $1300\text{ }^\circ\text{C}$ вміст водню в сухому синтез-газі знижується з $57,5$ до 57% , а вміст CO збільшується з 34 до $36,5\%$. Тут потрібна масова витрата окиснювача, що не перевищує $5\text{...}7\%$ від масової витрати одержуваного синтез-газу. Витрата електричної енергії — від $0,68\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ (вологість близька до нуля) до $1,5\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ (вологість $0,15\text{ г/кг}$). Основний висновок полягає в тому, що новим технологіям перероблення вуглецевмісних відходів, що прийняті до реалізації, слід базуватись на використанні в якості окиснювача кисню та перегрітої водяної пари до температур $> 1000\text{ }^\circ\text{C}$.

Нові технології мають здійснюватися в слабоокиснювальній і відновлювальній атмосферах і мати дві розділені у просторі зони: середньотемпературну зону ($T < 1000\text{ }^\circ\text{C}$) для сушіння, піролізу та газифікації, і високотемпературну зону ($T > 1300\text{ }^\circ\text{C}$) для завершення процесів газифі-

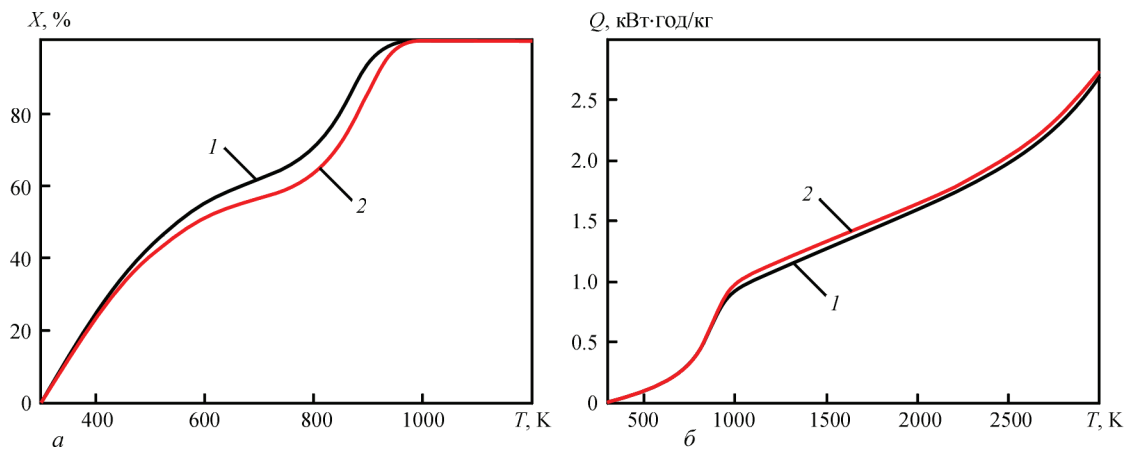


Рис. 16. Залежність ступеня газифікації (а) та енергоспоживання плазми (б) при газифікації біомаси (гною) від температури: 1 — плазмова газифікація; 2 — плазмовий піроліз [66]

кації, видалення неорганічної частини відходів і нагріву газоподібного продукту (синтез-газу) до оптимальної температури.

У роботі [66] аналізується використання плазмової технології для переробки біомаси (БМ) у вигляді змішаного гною тварин великої рогатої худоби, коней, овець, кіз і свиней (вміст вологи 30 %). Характерний склад біомаси (гною) виглядає таким чином в мас. %: H_2O — 30; С — 29,07; Н — 4,06; О — 32,08; S — 0,26; N — 1,22; P_2O_5 — 0,61; K_2O — 1,47; CaO — 0,86; MgO — 0,37. Переважна частина органічної речовини складається з целюлози ($(C_6H_{10}O_5)_n$) і містить трохи органічної сірки (S). БМ на 95,21 % складається з органічної речовини, вміст мінеральної речовини 4,79 %. Біомаса має теплоту згоряння 16 МДж/кг. Для плазмової газифікації та піролізу використовували такі суміші за масою: 100 % БМ + 25 % повітря та 100 % БМ + 25 % азоту відповідно. Проведено експериментальні дослідження плазмово-хімічної газифікації та піролізу БМ на установці, основними елементами якої були плазмотрон постійного струму (номінальна потужність 70 кВт) і плазмово-хімічний реактор продуктивністю БМ близько 50 кг/год. Ступінь газифікації та питоме енергоспоживання плазми наведені на рис. 16.

З рис. 16 видно, що ступінь газифікації збільшувався з підвищенням температури в обох випадках, але за газифікації це було трохи швидше, ніж за піролізу. Однак за температури 950 К ступінь газифікації сягнув 100 % для обох процесів. Під час порівняння показників процесу плазмової обробки БМ розрахункові та експериментальні дані показали задовільну відповідність, розбіжність не більше 16 %. Продукти БМ, які оброблені плазмою, виявилися вільними від шкідливих домішок як у розрахунках, так і в експериментах, що підтверджує екологічні переваги плазмової обробки. Використовуючи коефіцієнти ексергії теплоти

згоряння біомаси, зроблено висновок, що плазмова газифікація біомаси на 25 % ефективніша, ніж традиційне спалювання.

Визначено можливість газифікації деревних гранул до синтез-газу в середовищі термічної повітряної плазми [67]. Аналізувався вплив потужності плазмотрона, витрати плазмоутворюючого газу та коефіцієнта еквівалентності на газифікацію біомаси. Вихід синтез-газу варіювався від 59,95 до 62,51 %, а співвідношення H_2/CO — від 0,68 до 0,8. Найбільші концентрації H_2 і CO в отриманому газі склали 26,6 і 33,35 % відповідно, що давало співвідношення H_2/CO — 0,8. Нижча теплотворна здатність отриманого синтез-газу варіювалася від 7,62 до 8,82 МДж/нм³. Коефіцієнти конверсії вуглецю та енергії становили 85,3...97,2 % і 29,23...30,57 % відповідно. Питомі енерговитрати варіювалися в діапазоні 165,47...195,61 кДж/моль синтез-газу. При цьому питома витрата електроенергії на газифікацію деревних відходів і ефективність газифікації склали 2,49 кВт·ч/кг і 82 % відповідно. Окрім того, оцінка енергетичного та масового балансу засвідчила, що за умови газифікації 20,73 кг/год деревних гранул отриманий синтез-газ може виробити 15...18 кВт·год і 111...114 кВт·год електричної та теплової енергії відповідно.

Із трьох досліджених біомас [68] (цукрової макухи, рисового лушпиння та тирси) тирса є найзручнішою для процесу отримання синтез-газу, багатою на водень, оскільки з неї можна отримати більше водню (~ 97 г/кг біомаси). Але при цьому потребує більшого споживання електроенергії плазмовими пальниками (2,23 кВт·год/кг біомаси). У цьому сенсі рисове лушпиння показує найгірші результати з максимальним питомим виробництвом водню 54 г/кг біомаси при 27,5 кВт·год/кг виробленого водню. Як остаточний висновок, дане дослідження підтвердило, що плазмову газифікацію із сумішшю

повітря та пари як агента, що газифікує, можна використати для виробництва газу, багатого воднем, із питомим виробництвом у діапазоні 1,79...2,80; 1,68...2,37 та 2,09...2,81 $\text{нм}^3/\text{кг}$ із цукрової макухи, рисового лушпиння та тирси відповідно, і при цьому з нижчим споживанням електроенергії на кілограм водню, ніж при водному гідролізі.

Плазмові струмені при атмосферному тиску є основним інструментом для газифікації. Підраховано, що плазмотрон споживає лише 2...5 % від загального обсягу енергії, що надходить до системи газифікації, і до 80 % від загального обсягу енергії, що надходить у сировину, може бути відновлене у виробленому синтез-газі. У 2010 р. наукові системи сертифікації (SCS) повідомили, що процес плазмової газифікації призвів до найнижчих викидів парникових газів при тому ж обсязі енергії. При цьому приблизно на 31 мільйон тонн менше еквівалента $\text{CO}_2/\text{МВт}\cdot\text{год}$ порівняно зі сміттєзвалищем, з рекуперацією енергії та приблизно на 50000 тонн менше еквівалента $\text{CO}_2/\text{МВт}\cdot\text{год}$ порівняно зі спалюванням природного газу [69]. Разом з тим, виходячи з вищезазначених результатів і цілей сталого розвитку енергетики, інтеграція високоєфективних газифікаторів біомаси будь-якого типу в передові системи виробництва відбуватиметься на майбутньому світовому енергетичному ринку на порівняльній основі. Останніми роками виробники докладають численних зусиль для зниження вартості впровадження газифікаторів на біомасі. Основною гальмівною причиною є вища вартість придбання плазмового обладнання в пропонованому циклі порівняно з традиційними процесами, а також використання складного обладнання. У даному дослідженні оцінюється місце вдосконаленого плазмового циклу для виробництва енергоносіїв з високою потужністю та ефективністю. Зниження вартості обладнання безпосередньо пов'язане зі зниженням споживання електроенергії плазмовими пальниками ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ біомаси) при збереженні показників ефективності. Зниження загального енергоспоживання системи може бути досягнуто за рахунок оптимізації потоків енергії в реакторі газифікації — мінімізації вільної енергії Гіббса [70] і використанні плазми не тільки як додаткового джерела тепла, а і для локального стимулювання хімічних реакцій у зоні надрівноважного нагріву. Необхідно врахувати наступне.

1. Температура синтез-газу, що відходить, висока — $1000\text{ }^\circ\text{C}$ і вище, і є багато можливостей для утилізації відпрацьованого тепла на додачу до введення енергії плазми та часткового спалювання матеріалу відходів. Авторами було проведено

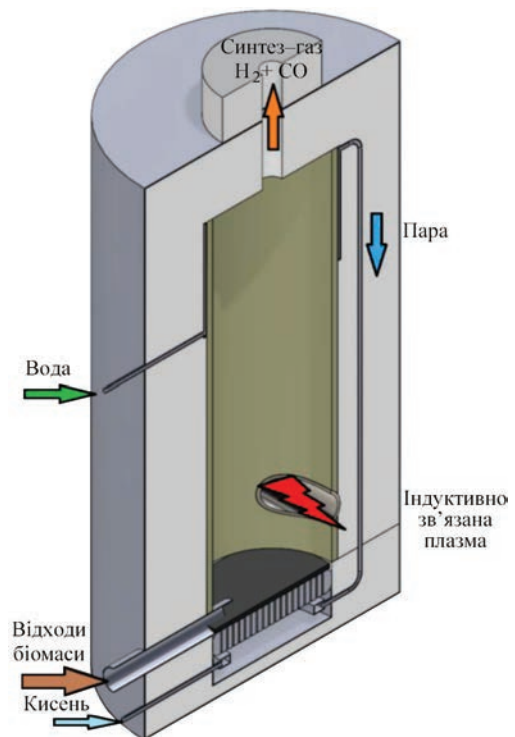


Рис. 17. Схема реактора, прийнятого для моделювання

енергетичну оптимізацію системи газифікації біомаси з використанням високотемпературного синтез-газу, що відходить, для попереднього нагрівання вхідної водяної пари.

2. Використання ВЧІ плазми підвищеного об'єму (рис. 14) збільшує ефективну площу, доступну для взаємодії з поверхнями.

3. Використання ВЧІ плазми для локального надрівноважного нагрівання та стимулювання хімічних реакцій. Схему реактора, прийнятого для моделювання, наведено на рис. 17.

Виконання цих умов створює передумови для зниження встановленої потужності плазмового обладнання з відповідним зниженням вагогабаритних показників і вартості. Як правило, обладнання ВЧІ плазми містить у собі джерело живлення (радіочастотний генератор і узгоджувальну мережу), плазмотрон і реактор. Більшість процесів, заснованих на ВЧІ плазмі, використовують рівноважну плазму в діапазоні температур $8000\text{...}12000\text{ K}$. Щодо комерційного застосування ВЧІ плазми до теперішнього часу, то в основному це обробка порошків і космічні дослідження, а також деякі екологічні додатки: дисоціація хлористого водню, обробка медичних відходів [71], розкладання полівінілхлориду [72]. ВЧІ плазма при низьких тисках тут не розглядається, тільки термічна плазма з високою ентальпією. Для газифікації біомаси та переробки відходів ВЧІ метод важливий для отримання термічної плазми з високою температурою газу при високих тисках. Існують і потребують

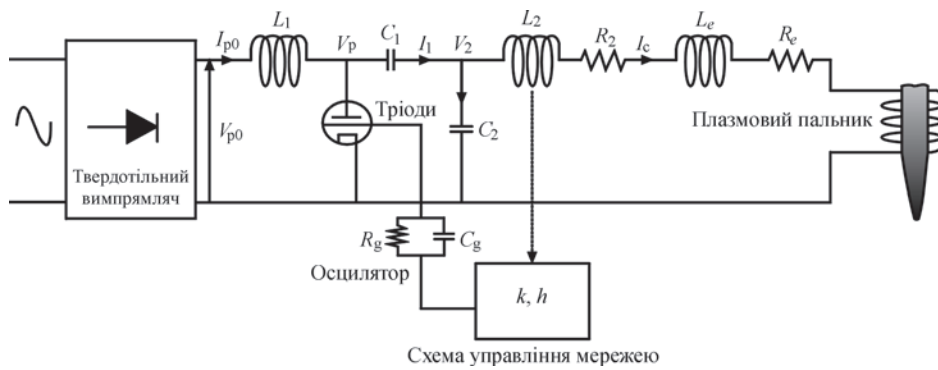


Схема управління мережею

Рис. 18. Типова структурна електрична схема джерела живлення ВЧІ-плазмотрона на генераторній лампі [59, 73]

подальшого вивчення та опрацювання кілька проблем, такі як збудження ВЧІ плазмового розряду за атмосферного тиску та ефективність джерел ВЧІ живлення. Вони сьогодні базуються на генераторній лампі в електричній схемі силової електроніки (рис. 18) [59, 61, 73]. Загальні проблеми під час генерації плазми: розмір — ВЧІ-генераторів, вони зазвичай є великими, важкими блоками; надійність — у генераторах використовуються лампи з обмеженим ресурсом; ефективність — генератори із силовою лампою завжди були неефективними. Причинами є: втрати потужності — переважна частина потужності розсіювалася на лампі; невисока надійність — у генераторах, які використовують силові лампи, відбувається їхня заміна приблизно кожні два роки, залежно від використання; у генераторі присутня висока напруга близько 10 кВ, що збільшує ймовірність невдачі; проблеми в обслуговуванні — генератори є складними елементами, які потребують трудомістких процедур для ремонту, якщо трапляється збій у роботі. У переважній частині сучасних плазмових ВЧІ-генераторів починають використовуватися твердотільні електронні компоненти. Це значно зменшує розміри

сучасних плазмових генераторів і набагато більше підходить для експлуатації. ВЧІ-генератори, що мають ККД 90 % і вище, нині успішно використовуються при низькому тиску та малій потужності плазмотронів. Твердотільні ВЧІ-генератори (на кшталт рис. 19) високої потужності (> 25 кВт) перебувають у стадії розроблення.

На рис. 19 показано електричний ланцюг твердотільного джерела живлення для ВЧІ-плазмотрона [74]. Блок живлення складається з чотирьох основних частин: випрямна схема, ізолюваний затвор, біполярний транзистор IGBT, ланцюг преривача перетворювача постійного струму, ланцюг повномостового інвертора MOSFET і ланцюг узгодження імпедансу з узгоджувальним трансформатором і ланцюгом серії LC. Частота інвертора MOSFET регулюється в межах 350...450 кГц за допомогою керування фазовим автопідстроюванням частоти для узгодження імпедансу навантаження. Ця частота 350...450 кГц набагато менша, ніж та, яка використовується у ВЧІ-плазмотронах. У даному випадку електромагнітне поле нижчої частоти реалізує більшу глибину скін-шару в плазмі, що допомагає підтримувати великий обсяг плазми.

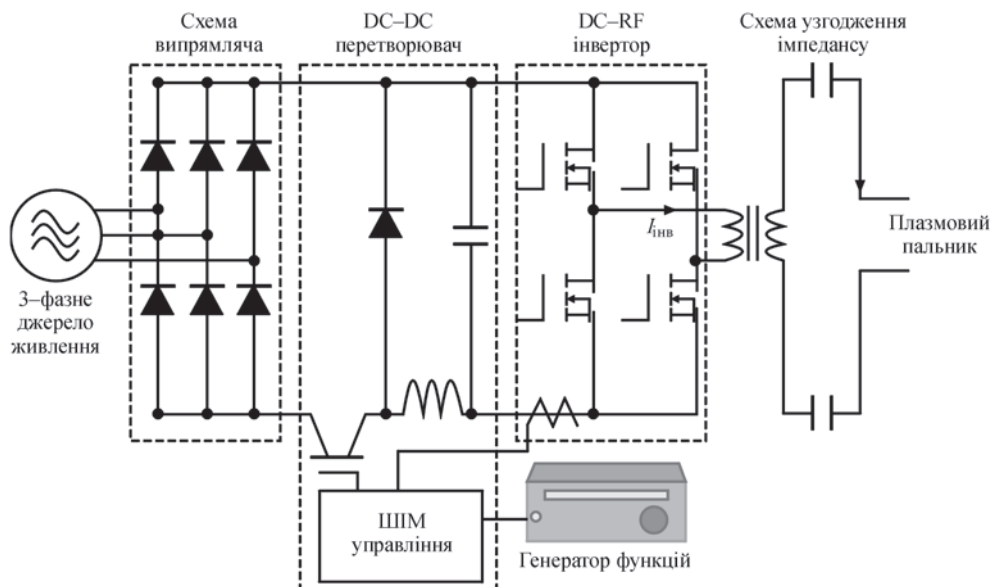


Рис. 19. Схема твердотільного ВЧІ-генератора для живлення плазмотрона [74]

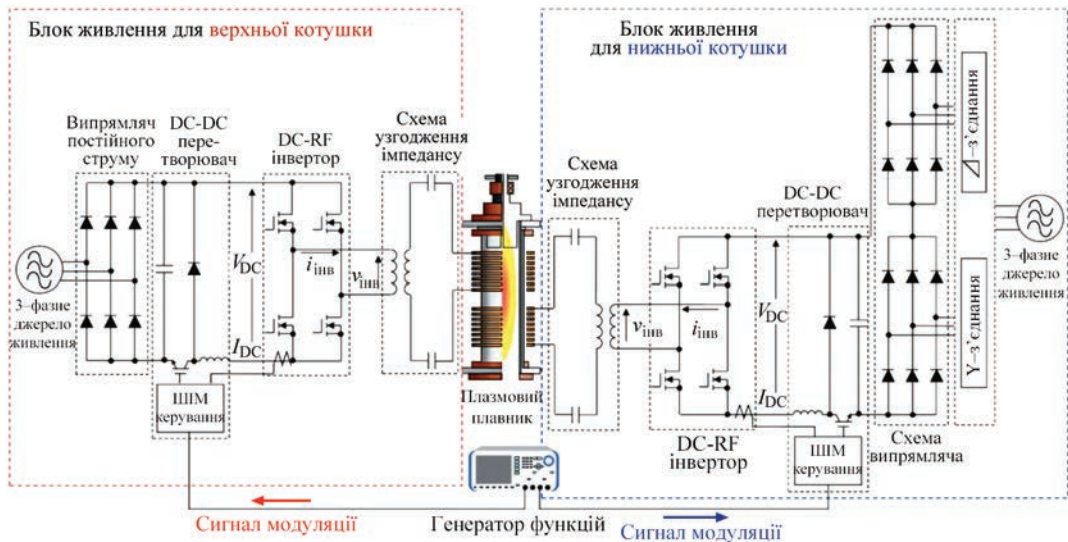


Рис. 20. Індукційна термоплазмова система тандемного типу

Крім того, прийняття цієї нижчої частоти дозволяє використовувати енергію MOSFET із низькою вартістю. В експериментах було підтверджено, що загальна ефективність перетворення енергії цього джерела живлення вища за 95 % для всіх випадків. Такий вищий коефіцієнт перетворення енергії є перевагою використання напівпровідників для підтримання потужної ВЧІ плазми. Вхідна потужність постійного струму була зафіксована на рівні 10 кВт.

Сучасні потужні 13,56 або 27,12 МГц, 120 кВт, 50 Ом генератори з кварцевим приводом [75] на генераторній лампі все ж таки мають низьку енергоефективність, значні габарити та вартість, тому транзисторні підсилювачі розглядаються як джерело живлення наступного покоління ВЧІ-джерел. Переваги порівняно з ламповими генераторами: вищий ККД (90 % і вище), менша вартість, схемні спрощення з меншими вимогами до охолодження та завдяки перевірній надійності плюс чудові характеристики роблять твердотільні підсилювачі дуже привабливим варіантом для наступного покоління джерел живлення [76]. Хоча це й вагомні аргументи, проте твердотільний генератор має бути експериментально підтверджений практичним досвідом роботи з плазмовими пристроями. Протягом багатьох років твердотільні генератори замінили лампові генератори в галузі радіомовлення. Переваги використання таких грамотно спроектованих серійних виробів для електропостачання плазмових джерел мають потенційно вищу надійність і нижчі витрати порівняно з ламповими.

Підвищення потужності досягається комбінуванням. Випробуваний твердотільний генератор складається з 50 модулів максимальною потужністю кожен 1,5 кВт. Кожен модуль комутується чотирма транзисторами. Отримані прямокутні хвилі розташовуються паралельно на «суматорно-

му» феритовому осерді, а потім перетворюються на синусоїдальну хвилю за допомогою вихідного фільтра. Навіть якщо один або кілька модулів вийдуть з ладу, генератор все одно буде працездатним, хоча й при меншій максимальній вихідній потужності. Модуль може бути замінений за короткий час, що підвищує надійність і ремонтпридатність системи порівняно з ламповими генераторами, що самозбуджуються. На відміну від лампових генераторів, усередині твердотільного генератора немає високої напруги і, отже, немає накопиченої енергії, яку потрібно видаляти під час швидкого вимкнення. Модульна концепція та відсутність високої напруги — ще одна причина розраховувати на високу надійність.

Для масштабування плазмової газифікації генератори повинні мати максимальну вихідну потужність до 200 кВт для того, щоб забезпечити достатній запас потужності. Для індуктивно зв'язаної плазми більшість сучасних твердотільних систем забезпечують ККД близько 70...75 %, тобто 70...75 % споживаної потужності фактично надходить у плазму.

Підвищення потужності для твердотільних генераторів може бути також досягнуто на базі нової індукційної термоплазмової системи тандемного типу з використанням двох джерел ВЧІ живлення і двох котушок індукторів для одного плазмотрона (рис. 20) [77].

В ITER-India Institute for Plasma Research розроблено та випробувано 40 кВт, 1 МГц твердотільне високочастотне джерело живлення з індуктивно зв'язаною плазмою [78]. Джерело потужністю 40 кВт було розроблено шляхом конфігурування кількох мостових інверторних модулів із використанням комутаційних напівпровідників останнього покоління, магнітних

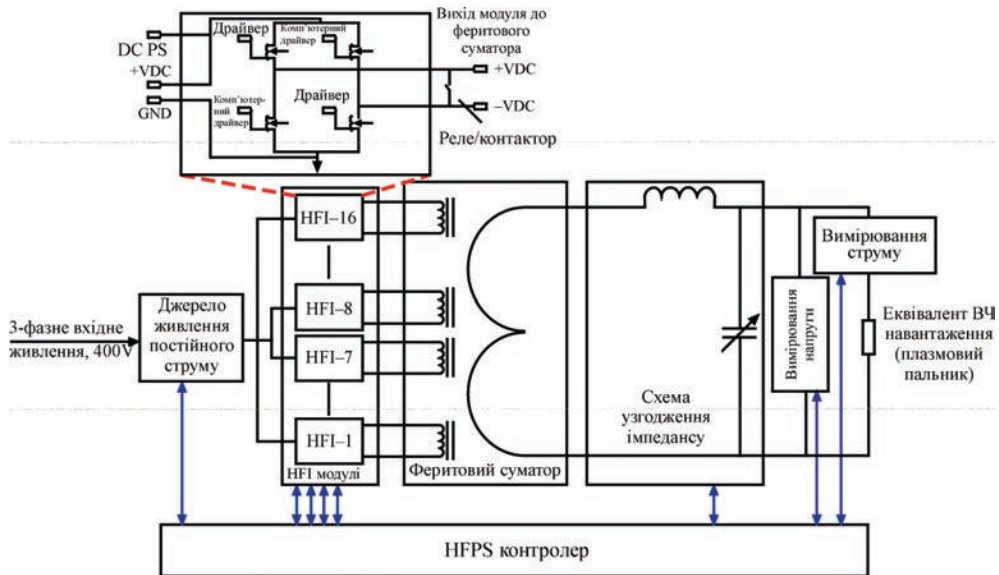


Рис. 21. Схема 40 кВт твердотільного джерела живлення індукційного плазмотрона

суматорів і LC-налаштування мережі, для забезпечення синусоїдального виходу 1 МГц при стандартному навантаженні 50 Ом (рис. 21). Досвід роботи з 40 кВт гемодіалізацією великого обсягу (HVHF) забезпечує значне розуміння реальних сценаріїв роботи в поєднанні з джерелами плазми на основі радіочастот. Це має стати основою для наступного кроку — розроблення джерела потужністю 200 кВт.

Завдання підвищення енергоефективності генераторів індукційної плазми цілком здійсненне через енергоефективну перетворювальну техніку, основою якої є електронна компонентна база силової електроніки на основі широкозонних напівпровідників. Основні напівпровідникові матеріали для силової електроніки — Si, GaAs, SiC, GaN. Усі сучасні успіхи в потужній і надпотужній електроніці асоціюються з кремнієвими ізольованими біполярними транзисторами (IGBT). Є можливість створення IGBT-приладів на основі GaAs, SiC і GaN [79]. При розробленні силових електронних перетворювачів для генераторів плазми прагнуть досягнення високої ефективності і водночас високої густини потужності. Збільшення частоти комутації ставлять нові завдання, оскільки комутаційні втрати пропорційні частоті перемикання, що обмежує ефективність системи за високих частот. Водночас багато стандартів висувають жорсткіші вимоги до ефективності системи. Що стосується робочої частоти, то більшість конструкцій на основі кремнію сьогодні працюють на частоті 60...300 кГц. Якщо частота перемикання 500 кГц або вище, це може бути досягнуто тільки за допомогою GaN. SiC зазвичай розраховані на робочу напругу 650...1200 В і вище. На рис. 22 наведено

діаграму залежності потужності від частоти різних пристроїв з їх застосуванням [80].

За прогнозами, у найближчі п'ять років використання карбіду кремнію в силовій електроніці зростатиме й становитиме найбільший ринок широкосмугової електроенергетики, за ним слідує нітрид галію (з урахуванням потужності та затребуваних ВЧ пристроїв). SiC сприяє підвищенню напруги, що витримується, і потужності, в той час як GaN сприяє використанню вищої частоти, що розширює сфери застосування силових пристроїв, зокрема в бік створення генераторів ВЧІ плазми.

Завдання полягає в тому, щоб оперативно переносити новітні результати досліджень у складне виробництво. До теперішнього часу запит на силову електроніку для плазмової інженерії переважно був пов'язаний з вакуумною технікою тонких плівок, травлення. Джерела ВЧІ плазми почали досліджуватися наприкінці 1990-х років, зрештою, стали широко використовуватися у виробництві напівпровідників [82, 83]. У серійному виробництві випускаються твердотільні апарати типу Vacuum Power Plasma Supply (RF) 6 кВт, 13,56 МГц [84]. Подальший розвиток потужних ВЧІ плазмових генераторів можливий у різних напрямках, зокрема як технології космічних двигунів. Представлено експериментальні результати для потужного (до 180 кВт) індуктивного плазмового генератора з високим тепловим ККД до 84 % при збудженні плазми в молекулярних газах [85].

Наразі технології в галузі твердотільних пристроїв силової електроніки перебувають у швидкому розвитку. Нові моделі являють собою інноваційні пристрої, що використовують хороші властивості матеріалів з широкою забороненою

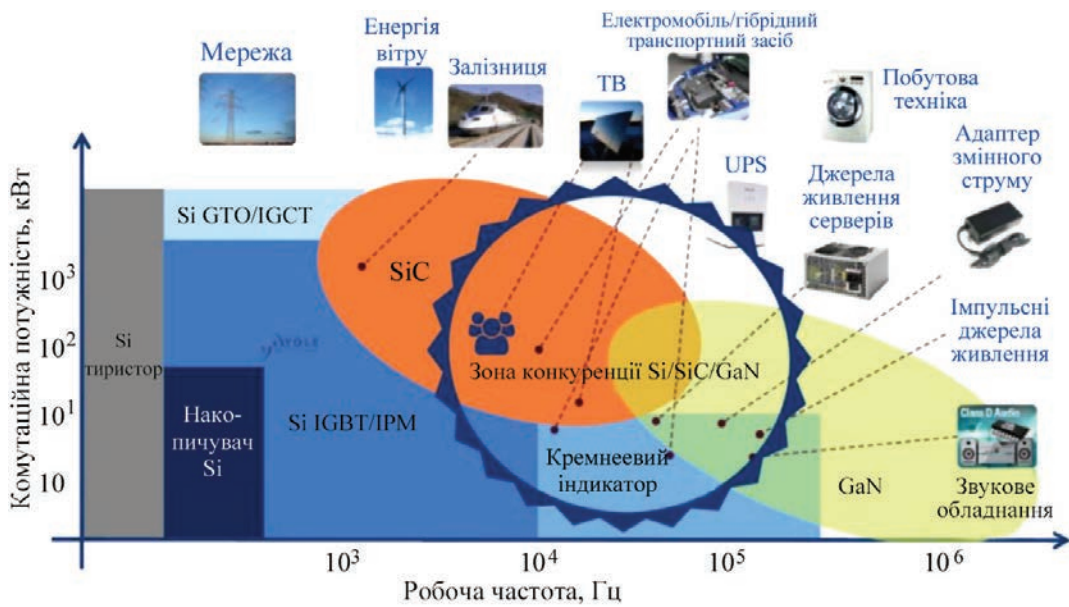


Рис. 22. Діаграма залежності потужності від частоти та сфери застосування силових пристроїв [80, 81]

зоною, таких як карбід кремнію і арсенід галію. Промислові та академічні дослідницькі інтереси зосереджені на розробці добре зарекомендованих і нових силових пристроїв, спрямованих на отримання хорошої продуктивності та підвищеної економії енергії, з наголосом на найважливіші аспекти й проблеми, які необхідно розв'язати, на думку авторів, для повної реалізації парадигми — досконалішого перероблення відходів у корисні продукти.

Висновки

У даній статті наведено позитивні аргументи щодо плазмової газифікації біомаси як перспективної, життєздатної та економічно вигідної технології. Показано, що процес не обмежується якою-небудь конкретною сировиною та конкретним продуктом, але є гнучким по відношенню до переробки відходів біомаси, які можуть бути токсичними або забрудненими, для створення корисних продуктів.

Проаналізовано вплив різних параметрів плазмової газифікації на властивості та вихід синтез-газу з метою сприяння оптимізації майбутніх досліджень та процесу в цілому. Показано, що плазмова газифікація може бути ефективним способом перетворення, у тому, числі токсичної та вологої біомаси у збагачений воднем синтез-газ, щоб зробити процес газифікації чистішим та працювати з вищою ефективністю. Газифікація загалом має низку негативних соціальних та екологічних наслідків впливу, які можуть бути зведені до мінімуму за рахунок відповідної плазмової технологічної реалізації.

Внаслідок багаторічної експлуатації плазма визнана ефективним методом знищення небезпечних відходів. Однак плазмові установки коштовні та використовують багато електроенергії. У статті показано нові технологічні рішення цих проблем за рахунок оптимізації потоків енергії в реакторі газифікації, раціонального використання плазми як концентрованого потоку енергії, зниження споживання електроенергії плазмовими пальниками, зменшення потужності та вартості плазмових установок, радикального вирішення проблеми їх надійності.

Як видно з проведеного дослідження, плазмова газифікація біомаси має переваги в порівнянні з традиційними варіантами отримання збагаченого воднем синтез-газу. Щодо економічної перспективи, то в новому підході при будівництві великотоннажного виробництва очікуються нижчі капітальні та експлуатаційні витрати.

Список літератури/References

1. Sikarwar, V.S., Zhao, M., Clough, P. et al. (2016) An overview of advances in biomass gasification. *Energy & Environmental Sci.*, 9(10), 2927–3304. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6ee00935b>
2. *World Energy Outlook 2015*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5a314029-69c2-42a9-98ac-d1c5deeb59b3/WE02015.pdf>
3. Song, H., Yang, G., Xue, P. et al. (2022) Recent development of biomass gasification for H₂ rich gas production. *Applications in Energy and Combustion Sci.*, 10, 100059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100059>
4. de Lasa, H., Salaices, E., Mazumder, J., Lucky, R. (2011) Catalytic steam gasification of biomass: Catalysts, thermodynamics and kinetics. *Chemical Reviews*, 111(9), 5404–5433. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr200024w>

5. Nipattumakul, N., Ahmed, I.I., Gupta, A.K., Kerdsuwan, S. (2011) Hydrogen and syngas yield from residual branches of oil palm tree using steam gasification. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 36(6), 3835–3843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.102>
6. Dincer, I. (2012) Green methods for hydrogen production. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
7. Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., Cabrita, I. (2003) The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. *Fuel*, 82(7), 835–842. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00313-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00313-7)
8. Larsson, A., Kuba, M., Vilches, T.B. et al. (2021) Steam gasification of biomass — Typical gas quality and operational strategies derived from industrial-scale plants. *Fuel Proc. Technol.*, 212, 106609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106609>
9. Khan, M.J., Al-Attab, K.A. (2022) Steam gasification of biomass for hydrogen production — A review and outlook. *J. of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sci.*, 98(2), 175–204. DOI: <https://doi.org/10.37934/arfmts.98.2.175204>
10. Henriksen, U., Ahrenfeldt, J., Jensen, T.K. et al. (2006) The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier. *Energy*, 31(10–11), 1542–1553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.05.031>
11. Trippe, F., Fröhling, M., Schultmann, F. et al. (2011) Techno-economic assessment of gasification as a process step within biomass-to-liquid (BtL) fuel and chemicals production. *Fuel Proc. Technol.*, 92(11), 2169–2184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.06.026>
12. Hasler, P., Nussbaumer, Th. (1999) Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. *Biomass and Bioenergy*, 16(6), 385–395. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00018-5)
13. Asadullah, M. (2014) Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 29, 201–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.074>
14. Petrov, S.V., Katircioğlu, T.Y. (2020) *Technological aspects of steam and water plasma*. OmniSkriptum Publishing Group.
15. Zhang, Q., Dor, L., Fenigstein, D. et al. (2011) Gasification of municipal solid waste in the plasma gasification melting process. *Applied Energy*, 90(1), 106–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.041>
16. Sanjaya, E., Abbas, A. (2023) Plasma gasification as an alternative energy-from-waste (EFW) technology for the circular economy: An environmental review. *Resources, Conservation and Recycling*, 189, 106730. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106730>
17. (2008) Independent waste technology report. The alter NRG/WESTINGHOUSE plasma gasification process. http://energy.cleartheair.org.hk/wp-content/uploads/2013/09/Westinghouse_Plasma_Gasification.pdf
18. Hrabovsky, M. (2011) Thermal plasma gasification of biomass. In: *Progress in Biomass and Bioenergy Production*. DOI: <https://doi.org/10.5772/18234>
19. Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M. et al. (2018) Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 82(1), 576–596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>
20. Hlina, M., Hrabovsky, M., Kavka, Konrad, T.M. (2014) Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste. *Waste Management*, 34(1), 63–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.018>
21. Tamošiūnas, A., Valatkevičius, P., Valinčius, V., Levinskas, R. (2016) Biomass conversion to hydrogen-rich synthesis fuels using water steam plasma. *Comptes Rendus. Chimie. Inter. Renewable Energy Congress*, 19(4), 433–440. DOI: [10.1016/j.crci.2015.12.002](https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.12.002)
22. Zhovtyanskij, V., Ostapchuk, M. (2022) Plasma technologies in the problem of producing “more than green hydrogen”. *Gorenie i Plazmohimiya*, 20(1), 11–32. DOI: <https://doi.org/10.18321/cpc478>
23. Obiora, N.K., Ujah, C.O., Asadu, C.O. et al. (2024) Production of hydrogen energy from biomass: Prospects and challenges. *Green Technol. and Sustainability*, 2(3), 100100 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100100>
24. Nagar, V., Kaushal, R. (2024) A review of recent advancement in plasma gasification: A promising solution for waste management and energy production. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 77(5), 405–419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.180>
25. (2015) «World’s largest» gasification plant nears completion. Ed. by T. Goulding. <https://www.letsrecycle.com/news/worlds-largest-gasification-plant-nears-completion/>
26. *Development of a commercial reactor for high-temperature plasma gasification of waste*. <https://www.inews24.com/view/1469770>
27. Borges, P.T., Lora, E.E.S., Venturini, O.J. et al. (2024) A comprehensive technical, environmental, economic, and biometric assessment of hydrogen production through biomass gasification, including global and brazilian potentials. *Sustainability*, 16(21), 9213. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16219213>
28. DNV Report: *Hydrogen Forecast to 2050*. https://aben.com.br/wp-content/uploads/2022/06/DNV_Hydrogen_Report_2022_Highres_single1.pdf
29. Ball, M., Wietschel, M. (2009) The future of hydrogen-opportunities and challenges. *Inter. J. of Hydrogen Energy*, 34, 615–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014>
30. Arregi, A., Amutio, M., Lopez, G. et al. (2018) Evaluation of thermochemical routes for hydrogen production from biomass: A review. *Energy Conversion and Management*, 165, 696–719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.089>
31. *Oregon. Biomass energy*. <http://www.oregon.gov/ENERGfi/RENEW/Biomass/>
32. Demirbas, A. (2005) Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Sci.*, 31(2), 171–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002>
33. (2015) *IEA. Technology roadmap — Hydrogen and fuel cells*. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>
34. *Phyllis — database for biomass and waste*. <https://www.fao.org/4/y0909e/y0909e09.htm>
35. Jia, G. (2021) Combustion characteristics and kinetic analysis of biomass pellet fuel using thermogravimetric analysis. *Processes*, 9(5), 868. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9050868>
36. Mason, P.E., Darvell, L.I., Jones, J.M. et al. (2015) Single particle flame-combustion studies on solid biomass fuels. *Fuel*, 151, 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.088>
37. Bryers, R.W. (1996) Fireside slagging, fouling, and high temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Sci.*, 22, (1), 29–120. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(95\)00012-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(95)00012-7)
38. Mason, P.E., Riaza, J., Chalmers, H. et al. (2016) Biomass fuel flexibility in future conventional power generation. In:

- Proc. of 5th IET Inter. Conf. on Renewable Power Generation 2016*. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0559>
39. Petrov, S., Stukhlyak, P., Bondarenko, S. et al. (2024) Steam plasma gasification of biomass using electrodeless plasmatrons. *The Paton Welding J.*, **6**, 20–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.06>
 40. Sidek, F.N., Abdul Samad, N.A.F, Saleh, S. (2020) Review on effects of gasifying agents, temperature and equivalence ratio in biomass gasification process. In: *Proc. of IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Kuantan, 1–2 October 2019*, 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012028>
 41. Jaworski, Z., Zakrzewska, B., Pianko-Oprych, P. (2017) On thermodynamic equilibrium of carbon deposition from gaseous C–H–O mixtures: Updating for nanotubes. *Rev. in Chemical Eng.*, **33(3)**, 217–235. DOI: <https://doi.org/doi:10.1515/revce-2016-0022>
 42. Liu, K., Song, C., Subramani, V. (2010) Hydrogen and syngas production and purification technologies. *Wiley, Hoboken, New Jersey*, **533**. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470561256>
 43. Kagakin, E.I., Bogomolov, A.R., Shevyrev, S.A., Pribaturin, N.A. (2013) Interaction of carbonized coal with superheated water vapor. *Polzunovskij Vestnik*, **1**, 135–138.
 44. Balat, M. (2008) Hydrogen-rich gas production from biomass via pyrolysis and gasification processes and effects of catalyst on hydrogen yield. *Energy Sources, Pt A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, **30**, 552–554. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567030600817191>
 45. (2006) *Plasma progress: Low-cost operation and clean energy at long last?* <https://waste-management-world.com/artikel/plasma-progress-low-cost-operation-and-clean-energy-at-long-last>
 46. Zitouni, A., Voutsas, E. (2021) Modeling, optimization and cost analysis of municipal solid waste treatment with plasma gasification. *Environmental Proc.*, **8**, 747–767. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00518-y>
 47. Mayoko, J.C., Lee, B., Nyazabe, S. et al. (2023) Plasma gasification, an eco-friendly solution for power generation and MSW treatment in Kinshasa, DR Congo. *Open Access Library J.*, **10(12)**. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1110424>
 48. Lourinho, G., Alves, O., Garcia, B. et al. (2023) Costs of gasification technologies for energy and fuel production: Overview, analysis, and numerical estimation. *Recycling*, **8(3)**, 49. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling8030049>
 49. Panicker, P.K., Magid, A. (2016) Microwave plasma gasification for the restoration of urban rivers and lakes, and the elimination of oceanic garbage patches. In: *Proc. of 10th Inter. Conf. on Energy Sustainability Collocated with the ASME 2016 Power Conf. and the ASME 2016 14th Inter. Conf. on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, June 26–30, 2016, Charlotte, North Carolina, USA*. ES2016-59632, V001T02A011; 14. DOI: <https://doi.org/10.1115/ES2016-59632>
 50. *Industrial microwave generators for next generation waste gasification*. <https://rfhic.com/case-studies/industrial-microwave-generators-for-waste-gasification-applications/>
 51. Petrov, S.V., Zhovtyansky, V.A. (2019) *Energy efficient steam-plasma technologies for waste processing*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 52. Gabbar, H.A., Darda, S.A., Damideh, V. et al. (2021) Comparative study of atmospheric pressure DC, RF, and microwave thermal plasma torches for waste to energy applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **47**, 101447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101447>
 53. *Applied plasma technologies. More products: Plasma torches*. <https://www.plasmacombustion.com/product-torches.html>
 54. Leblanc, D., Dolbec, R., Guerfi, A. et al. (2017) Silicon nanopowder synthesis by inductively coupled plasma as anode for high-energy Li-ion batteries: Arrays, functional materials, and industrial nanosilicon. In: *Silicon Nanomaterials Sourcebook*, 463–484. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315153551-24>
 55. *JEOL. TP series. RF induction thermal plasma. Products*. <https://www.jeol.com/products/industrial/eb/TPseries.php>
 56. Mirek, P. (2019) *Novel industrial scale radio frequency inductively coupled plasma torch. Master of applied science*. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto. <https://utoronto.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/b3fe4d3a-233b-421f-a5f3-8c36491dec3a/content>
 57. Strelko, O., Berdnychenko, Y., Pylypchuk, O. et al. (2021) Historical milestones in the development and creation of radio frequency inductively coupled plasma torches. In: *Proc. of Inter. 3rd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering, 26–28 August 2021*. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575482>
 58. Bottin, B., Chazot, O., Carbonaro, M. et al. (2000) The VKI plasmatron characteristics and performance. *72 Chaussee de Waterloo B-1640 Rhode-Saint-Genese, Belgium*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADP010745.pdf>
 59. Merkhouf, A., Boulos, M.I. (1998) Integrated model for the radio frequency induction plasma torch and power supply system. *Plasma Sources Sci. and Technology*, **7(4)**, 599. DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/7/4/017>
 60. Reed, T.B. (1961) Induction-coupled plasma torch. *J. of Applied Physics*, **32(5)**, 821–824. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1736112>
 61. Alavi, S., Khayamian, T., Mostaghimi, J. (2017) Conical torch: The next-generation inductively coupled plasma source for spectrochemical analysis. *Analytical Chemistry*, **90(5)**, 3036–3044. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.analchem.7b04356>
 62. Boulos, M.I., Fauchais, P., Pfender, E. (2016) *Inductively coupled radio frequency plasma torches: Handbook of Thermal Plasmas*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-12183-3_17-1
 63. Chung, P.M., Liu, S.W., Mirels, H. (1963) Effect of discontinuity of surface catalytic on boundary layer flow of dissociated gas. *Inter. J. of Heat and Mass Transfer*, **6(3)**, 193–210. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(63\)90106-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(63)90106-6)
 64. Chazot, O., Panerai, F., Muylaert, J.M., Thoemel, J. (2010) Catalysis phenomena determination in plasmatron facility for flight experiment design (Invited). In: *Proc. of 48th Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 04–07 January, 2010 Orlando, Florida*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-1248>
 65. Danilenko, A.A. (2012) *Experimental and theoretical studies of plasma gasification processes of carbon-containing technogenic waste: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Novosibirsk, 21.
 66. Messerle, V.E., Ustimenko, A.B., Lavrichshev, O.A., Nugman, M.K. (2024) The gasification and pyrolysis of biomass using a plasma system. *Energies*, **17(22)**, 5594. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17225594>
 67. Aikas, M., Gimžauskaitė, D., Tamošiūnas, A. et al. (2024) Thermal arc air plasma application for biomass (wood pellets) gasification. *Clean Technol. and Environmental Policy*, **26(1)**, 31–43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02566-4>
 68. Tamayo-Pacheco, J.J., Peña-Pupo, L., Vázquez-Peña, A., Brito-Sauvanell, Á.L. (2020) Hydrogen-rich syngas production by plasma gasification of existing biomasses in Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, **29(4)**, 53–63. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=IFME&u=anon~f-3c66468&id=GALE%7CA652867273&v=2.1&it=r&sid=googleScholar&asid=628dc909>

69. ISC3. International Sustainable Chemistry Collaborative Centre. <https://www.isc3.org/page/best-practice-detail/plasma-gasification>
70. Yao, S., Zhang, Y., Xia, J. et al. (2023) Cascade utilization of energy in high temperature syngas to reduce energy consumption in biomass gasification processes. *Case Studies in Thermal Engineering*, **52**, 103680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103680>
71. Paskalov, G. (2015) RF PLASMA: From R&D to commercial applications. In: *Proc. of 22nd Inter. Symp. on Plasma Chemistry, July 5–10, 2015, Antwerp, Belgium*. <https://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc22/O-23-2.pdf>
72. Fazekas, P., Czégény, Z., Mink, J. et al. (2016) Decomposition of poly (vinyl chloride) in inductively coupled radiofrequency thermal plasma. *Chemical Eng. J.*, **302(15)**, 163–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.044>
73. Merkhouf, A., Boulos, M.I. (2000) Distributed energy analysis for an integrated radio frequency induction plasma system. *J. of Physics D: Applied Physics*, **33(13)**, 1581–1587. DOI: <https://doi.org/0022-3727/33/13/304>
74. Tanaka, Y. (2021) Recent development of new inductively coupled thermal plasmas for materials processing. *Advances in Physics: X*, **6(1)**: 1867637. DOI: <https://doi.org/10.1080/23746149.2020.1867637>
75. Sairem. *Microwave and radio frequency*. <https://www.sairem.com/>
76. Kraus, W., Fantz, U., Heinemann, B., Franzen, P. (2015) Solid state generator for powerful radio frequency ion sources in neutral beam injection systems. *Fusion Eng. and Design*, **91**, 16–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.11.015>
77. Kuraishi, K., Akao, M., Tanaka, Y. et al. (2016) Temperature behavior in a tandem type of modulated induction thermal plasma for materials processing. *J. of Physics Conf. Series*, **441(1)**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/441/1/012016>
78. Gajjar, S., Upadhyay, D., Singh, N. et al. (2021) Experimental results of 40 kW, 1 MHz solid state high frequency power supply with inductively coupled plasma. In: *Proc. of AIP Conf.*, **2373**, 100002. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0057477>
79. Vojtovich, V., Gordeev, A., Dumanevich, A. (2010) Si, GaAs, SiC, GaN – power electronics. Comparison, new possibilities. *Silovaya Elektronika*, **5**, 4–10.
80. *Semiconductor today*. <https://www.semiconductor-today.com/features.shtml>
81. <https://www.eetrend.com/content/2021/100555218.html> Debuted at CICD 2021 to empower the third-generation semiconductor industry with advanced ALD technology
82. *Proc. of 9th Inter. Conf. on Power Electronics for Plasma Eng. May 14–17, 2018, Freiburg, Germany*. <https://publica.fraunhofer.de/entities/mainwork/477cb287-1b40-424d-9d5c-ac4572604026>
83. Okumura, T. (2010) Inductively coupled plasma sources and applications. *Physics Research Inter.*, **1**. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/164249>
84. *PSTEK*. https://pstek.co.kr/wp-content/uploads/2019/12/PSTEK_Plasma-Power-Supplies.pdf
85. Georg, R., Chadwick, A.R., Dally, B.B., Herdrich, G. (2021) Power efficiency estimation of an inductive plasma generator using propellant mixtures of oxygen, carbon-dioxide and argon. *Acta Astronautica*, **179**, 536–545. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.020>

IMPLEMENTATION AND SUSTAINABILITY OF THE BIOMAS GASIFICATION PROCESS USING PLASMA TECHNOLOGIES

S.V. Petrov¹, O.I. Som², S.G. Bondarenko³, O.V. Sanginova³, M. Ganczarski⁴, E. Ró⁴

¹The Gas Institute of the NASU.

39 Degtyarivska Str., 03113, Kyiv, Ukraine

²Plasma-Master Co., Ltd.

3 Omelian Pritsak Str., 03142, Kyiv, Ukraine

³National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

37 Prosp. Beresteiskyi, 03056, Kyiv, Ukraine

⁴Hydrogenium P.S.A. (Simple Joint Stock Company)

3/27 Marii Curie-Skłodowskiej Str., Lublin, Poland, 20-029. E-mail: mg@hydrogenium.one

Waste biomass gasification technologies, especially with a focus on hydrogen production, have the potential for large-scale commercialization. The prerequisites for their development and promotion are innovative approaches to modeling, the use of traditional and new gasification mechanisms consistent with fundamental principles of theoretical physics; and the development of new technical solutions on this basis. Ultimately, the goal is to significantly improve the gasification process technical, economic, and environmental performance. In this context, plasma gasification is a promising renewable energy source from various wastes, including biomass. It contributes to achieving sustainable development goals: affordable and clean energy, climate change mitigation, waste diversion and resource reuse, reinforcing the concept of a circular economy. This paper presents an analysis and assessment of the conditions for increasing gasification processes reliability, productivity, and quality while reducing costs, including potential barriers to applying plasma technologies. The paper presents new technological solutions to the problems facing gasification, aimed at optimizing energy flows in the gasification reactor, rational use of plasma as a concentrated energy flow, reducing power consumption by plasma torches, and reducing the power and cost of plasma installations, as well as a radical solution to the problem of reliability of gasification equipment. The economic prospects for the transition to large-scale production, where a reduction in capital and operating costs can be expected, are considered. 85 Ref., 22 Fig.

Keywords: biomass gasification, plasma gasification, plasmatron, synthesis gas, gasifier, energy efficiency of the gasification process

Отримано 25.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 16.07.25

Прийнято 24.07.25