

УДК 519.63:533.9.07

Д.А. Брега, канд. техн. наук,
А.М. Алкіб
М.Т. Баршуши

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ ГАЗИФІКАЦІЇ З ІНТЕГРОВАНИМ ПЛАЗМОГЕНЕРАТОРОМ

Устаткування для газифікації сировини знаходить широке застосування в області перероблення твердих відходів, технологій газифікації вугілля і біомаси. Отримання генераторного газу дозволяє підвищити ефективність енергетичного сектора, а також зменшити навантаження на території, зайняті під звалища. На сьогодні 70 % усіх твердих побутових відходів (ТПВ) України зберігається на полігонах, які у більшості заповнені більш ніж на 90 %. У зв'язку з цим виникає насуцна необхідність перероблення ТПВ, використовуючи найсучасніші технології. Більшість європейських країн застосовують процеси піролізу для перероблення ТПВ з подальшим отриманням синтез-газу. Ряд фірм реалізує перероблення сировини в установках газифікації. Серед них такі фірми: Lurgi, Winker, Koppers-Totzek. Проте, подібним установкам характерні певні недоліки, до яких у першу чергу можна віднести невеликий відсоток виходу синтез-газу, у низьку продуктивність, високу чутливість до вологості й типу сировини, високий відсоток вмісту смол та інших шкідливих елементів, необхідність застосування складної, дорогої системи очищення.

Частково ці проблеми можуть бути вирішені з використанням технологій плазмової газифікації, які дозволяють підвищити глибину перероблення сировини і водночас знизити кількість шкідливих викидів до рівнів, які встановлено існуючими екологічними нормами. На сьогодні рядом фірм – Westinghouse, Solena, Europlasma, Plasco та ін. – створено промислові установки для плазмової газифікації різноманітної сировини.

Проте інтеграція генератора плазми в установці газифікації диктує необхідність додаткового врахування ряду параметрів, пов'язаних зі взаємним впливом різного роду фізичних процесів, що відбуваються не лише в газорозрядному тракті плазмотрона, але й у технологічному обладнанні в цілому.

Зокрема, суттєвий вплив на умови роботи генераторів плазми має система очищення газів, що відходять від газифікатора або плазмового реактора. Незважаючи на те, що кількість шкідливих речовин у таких газах для плазмового обладнання значно менша, ніж для звичайних термічних процесів, жодна з відомих плазмових установок не може використовуватись без системи газоочищення. Такі системи можуть включати обладнання різного типу: скрубери, механічні й електростатичні фільтри та ін. Але найбільш простим і економічно

вигідним способом видалення твердих домішок з газу, що відходить з плазмового обладнання, залишаються сепаратори циклонного типу.

Такі сепаратори використовуються і в промислових комплексах плазмової газифікації, і в газифікаторах зменшеної продуктивності для потреб малих підприємств, містечок або окремих господарств, де вони є основним обладнанням газоочищення. Їх використання дозволяє з ефективністю більше 90 % очищати синтезгаз від твердої фракції в діапазоні від 5 до 200 мкм. Ефективність роботи таких систем газоочищення визначається величиною надмірного тиску в газифікаторі, яка може досягати більше 20 кПа. У той же час зі збільшенням тиску підвищується вірогідність виникнення зворотних течій у газорозрядному каналі плазмогенератора, що, у свою чергу, негативно позначається на ресурсі катодного і анодного вузлів. У результаті використання існуючих методів газодинамічного проектування електродугових плазмотронів, що не враховують величину надлишкового тиску, може призводити до нестабільної роботи плазмового устаткування.

Таким чином, уся сукупність устаткування для плазмової газифікації повинна надійно працювати в умовах підвищеного тиску, що, у свою чергу, потребує врахування при проектуванні призначення режимів роботи плазмогенераторів.

Виходячи з цього, у даній роботі розглянути результати проведення натурних експериментів з визначення кількісних і якісних показників ефективності інтеграції плазмогенератора до складу комплексу газифікації.

Дослідна установка. Включала газифікатор з інтегрованим сепаратором циклонного типу для виконання первинної очистки газу від твердих домішок, плазмогенератор, блоки газозабезпечення, водозабезпечення та блок джерела живлення. Конструкція газифікатора (рис. 1, а) містить подвійну оболонку з жаростійкої сталі, простір між оболонками заповнений ізоляційним матеріалом. Завантаження сировини відбувається у верхній частині газифікатора через кришку, яка має рухомі кріплення на механічних фіксаторах, що в разі перевищення допустимих значень тиску в середині реактора розблоковують кріплення, дозволяючи кришці відкритися на певній кут для зменшення тиску. У зоні розпалення в конструкції передбачено конусну частину та перфоровану перегородку (на рис. 1 б, в не показано), що не дає можливості потрапляти у нижню частину газифікатора не до кінця згорівшим решткам сировини.

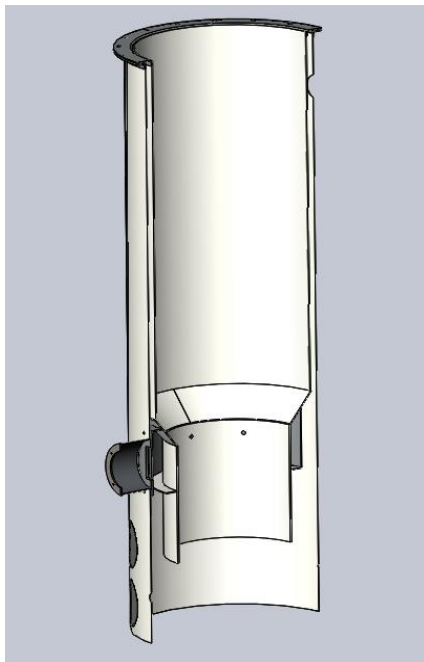
Розпалення газифікатора можливе або за допомогою плазмогенератора, або в ручному режимі, задля цього необхідно відкрити заслонку, що знаходиться у вхідному патрубку газифікатора (рис. 1, в), та увімкнути нагнітаючий вентилятор, в середину вхідного каналу підносять джерело вогню, полум'я якого через кільцеві отвори

потрапляє в середину реактора, залежно від сировини процес розпалу становить від 5 до 10 хв.

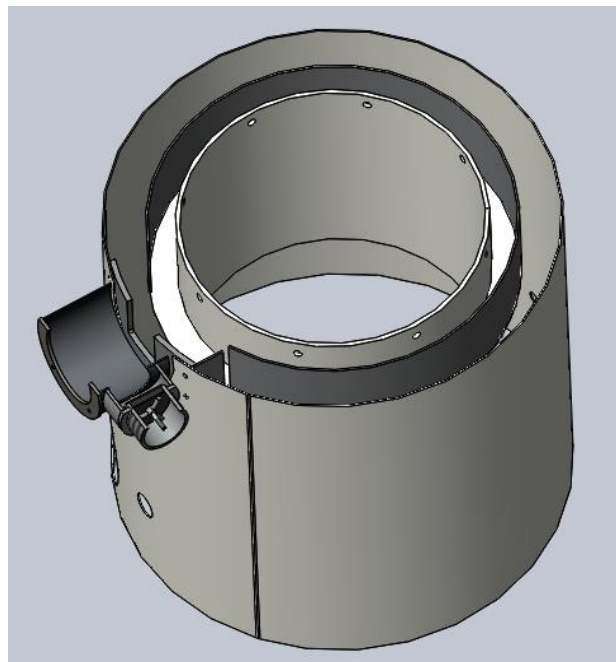
При використанні плазмогенератора достатньо увімкнути блок джерела живлення та відкрити вентилі подачі охолоджувальної рідини, після чого за допомогою осцилятора виконати ініціацію дуги та переключити блок живлення на мінімальний режим роботи. Час розпалу становить 1-2 хв.



а



б



в

Рисунок 1 – Загальний вигляд установки газифікації з джерелом живлення для плазмогенератора (а); переріз тривимірної моделі газифікатора (б); переріз тривимірної моделі газифікатора у зоні вхідного отвору (в)

Як джерело живлення для плазмогенератора використовувався апарат тиристорного типу АПР-404 з модернізованою системою управління напругою і силою струму дуги, що дозволило використовувати його при роботі з плазмогенераторами малої потужності, технічні характеристики апарата наведено в табл. 1. Основним критерієм використання апарата АПР-404 є стабільність горіння електричної дуги в інтенсивному потоці газу, що може бути забезпечено виконанням умови [1–3]:

$$\frac{dU}{dI} > \frac{dU_{\text{бж}}}{dI}$$

Ця умова може бути виконаною лише при використанні блоків живлення з круто падаючою вольт-амперною характеристикою, до яких насамперед належить апарат АПР-404, що забезпечує стійкий режим роботи плазмогенератора без використання баластного опору.

Таблиця 1 – Технічні характеристики установки повітряно-плазмового різання АПР-404

Найменування параметра	Значення
Номинальний робочий струм при ПВ=100%, А	400
Межі регулювання робочого струму, А	200...500
Споживана потужність, кВт	128
Умовна номінальна робоча напруга, В	270
Напруга холостого ходу, В	320
Плазмоутворювальний газ	Повітря
Тиск на вході, Па	$5 \cdot 10^5 \dots 6 \cdot 10^5$
Витрата повітря, л/с	0,083
Габаритні розміри джерела живлення, мм	1040x890x1706
Маса джерела живлення, кг	1400

Для збудження електричної дуги використовувався осцилятор з імпульсним джерелом живлення [4].

Блоки газо- та водопостачання необхідні для забезпечення плазмогенератора та газифікатора експериментальної установки повітрям, інертним газом і водою для охолодження. Забезпечення повітрям здійснювалося за допомогою компресора з тиском 1,0 МПа, а інертним газом - від балона через понижуючий редуктор. Вода в систему надходила від загальної магістралі з тиском до 0,4 МПа. Усі підключення газових і водяних магістралей були виконані гнучкими гумовими шлангами. подача охолоджувальної рідини здійснювалася через регулюючий кран, що дозволяє керувати об'ємними витратами води, для

контролю за витратами захисного та плазмоутворювального газу використовувалися ротаметри (РС3 та РС5 класу точності 2,5). Величина надлишкового тиску газів на вході до плазмогенератора вимірювалася за допомогою манометра. Для кожної магістралі подачі охолоджувальної рідини, захисного та плазмоутворювального газу була передбачена система фільтрації, що містила ступінь очищення від твердих домішок і конденсату, що міг бути присутнім у прокачуваному повітрі від компресорної станції.

У системі управління струмом на апараті живлення передбачено аварійне відключення плазмо генератора, коли контрольовані параметри перевищують допустимі межі.

Методика проведення експериментальних досліджень.

Основною задачею проведення експериментальних досліджень є перевірка ефективності роботи плазмогенератора у складі комплексу газифікації й оцінювання впливу його роботи на якісний склад газу на виході газифікатора, а також визначення залежності вольт-амперної характеристики від величини надлишкового тиску на зрізі плазмогенератора. Усі вимірювання здійснювалися після виходу установки та плазмогенератора у стаціонарний робочий режим. Напруга на електричній дузі вимірювалася за допомогою вольтметра магнітоелектричної схеми, а сила струму – міліамперметром постійного струму з шунтом 75ШСММ3 класу точності 0,5.

Для вимірювання складу газу використовувалися інфрачервоний та ємнісний газоаналізатори. Для заборів газу використовувалися скляні колби, заповнені водою й обладнані двома перекриваючими вентилями, колба розміщувалася безпосередньо біля виходу газифікатора, після чого відкривався нижній вентиль, при відкритті верхнього вода починала стікати, а вільний простір у колбі заповнювався газом для аналізу.

Гранулометричний аналіз проводився з використанням сит з різним прохідним розміром для визначення фракційного складу або розподілу з розмірами частинок порошоків і гранул. Ситовий аналіз здійснюють просіюванням проб матеріалу через набір стандартних сит, розмір отворів яких послідовно зменшується зверху вниз, унаслідок чого матеріал розділяється на фракції. Для виключення погрішностей вимірів усі сита перед просіюванням були оброблені ультразвуком і промиті. Для просіювання використовувався вібропривід ВП-30Т, призначений для передачі коливань встановлених на нього виробів – ситам аналізаторів і грохотів.

Порядок проведення вимірювань включав такі операції:

– визначення ваги кожного сита з точністю до 0,001 кг. Точну наважку випробовуваного порошку поміщають на верхнє сито і закривають кришкою;

– проводять просіювання будь-яким з методів упродовж 5 хв, потім обережно (без утрат речовини) знову зважують кожне сито і визначають масу речовини на кожному з сит.

Таким же способом визначають масу речовини на піддоні. Знову збирають набір сит, струшують упродовж 5 хв і зважують кожне сито, як описано вище. Ці процедури повторюють до тих пір, поки зміна ваги порошку на будь-якому з сит не становитиме менше 5 % (10 % у разі сит 76 мм) або менше 0,001 кг у порівнянні з попередньою масою речовини на цьому ситі.

Якщо на будь-якому з сит вага речовини становить менше 5 % від загальної маси випробовуваного зразка, то зміна ваги не повинна перевищувати 20 % у порівнянні з попередньою масою на цьому ж ситі. Якщо на будь-якому з сит знаходиться більше 50 % від загальної маси випробовуваного зразка, то за відсутності інших вказівок випробування повторюють, але до набору сит додають грубіше сито: між тим, яке несе надмірну масу, і попереднім, грубішим ситом.

Порівнюють загальні маси речовини до і після випробування. Загальна втрата не повинна перевищувати 5 % від первинної маси зразка.

Результати досліджень. На перших етапах газифікатор працював у штатному режимі без вмикання генератора плазми (рис. 2), як сировину для завантаження використовувалося деревне вугілля, після виходу установки на стаціонарний режим роботи було виконано забори проб газу з подальшим їх аналізом на газоаналізаторі.



Рисунок 2 – Горіння генераторного газу на виході газифікатора

Для запуску газифікатора на перших етапах необхідна примусова подача повітря у зону горіння. У базовій конструкції для цього передбачено використання нагнітального вентилятора. Повітря через кільцевий канал потрапляє в середину установки та через систему тангенціально розташованих отворів у зону горіння. Ініціація горіння виконувалася в ручному режимі. Однак наявність плазмогенератора суттєво полегшила створення підпалу сировини та підтримання необхідної температури всередині газифікатора до його виходу на режим завдяки використанню допоміжної електричної дуги [5].

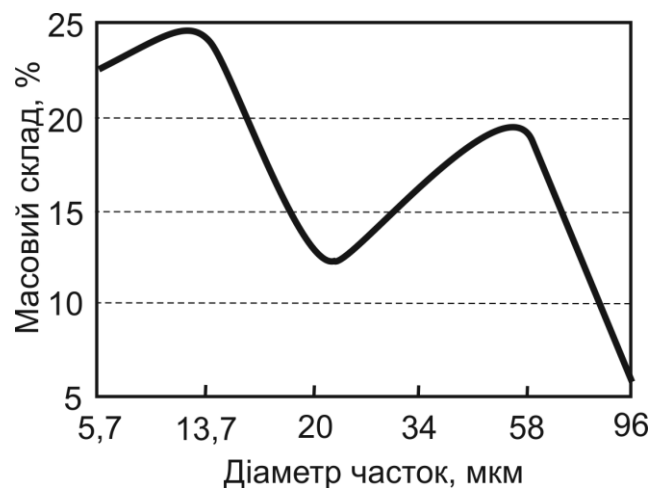
Робота плазмогенератора спочатку контролювалася поза установкою газифікації з подальшою установкою і включенням до складу газифікатора, після чого були зафіксовані пульсації і нестійкий режим роботи плазмогенератора, що призвело до стрімкої ерозії катодної вставки.

Попередній аналіз характеру зносу катодної і проміжних вставок установив одну з причин нештатної роботи генератора – зворотні струми в газорозрядному каналі, які є наслідком позитивного перепаду тиску на газифікаторі. Найбільшу величину гідравлічних втрат в системі газифікації має ступінь очищення, а саме сепаратор циклонного типу, залежно від витрат газу перепад тиску перед циклоном може становити від 0,5 до 20 кПа.

Тому для забезпечення сталої роботи плазмогенератора необхідно перш за все визначити геометричні параметри ступеня очищення, задля цього та для подальших розрахунків системи очищення на базі сепараторів циклонного було проаналізовано зольний залишок (рис. 3, а) і виконано гранулометричний аналіз твердої фракції з використанням сит з різним розміром осередку (рис. 3, б).



а



б

Рисунок 3 – Зольний залишок (а) і результати гранулометричного аналізу (б)

За методикою [6] було розраховано перепад тиску на сепараторі циклонного типу, з умови забезпечення 90 % ступеня очищення газу з домішками твердої фракції, яка має розміри, визначені за результатами гранулометричного аналізу. Виходячи з конструкції моделі сепаратора циклонного типу, який використовувався в експериментах, величина надлишкового тиску, яка забезпечувала заданий ступінь очищення, становила 2 кПа.

Спираючись на спроектовану модифіковану модель плазмогенератора, було виготовлено та протестовано модифіковану версію плазмотрона (рис. 4) та визначено режими подачі захисного газу, які забезпечували необхідний для сталої роботи термоемітера склад атмосфери.

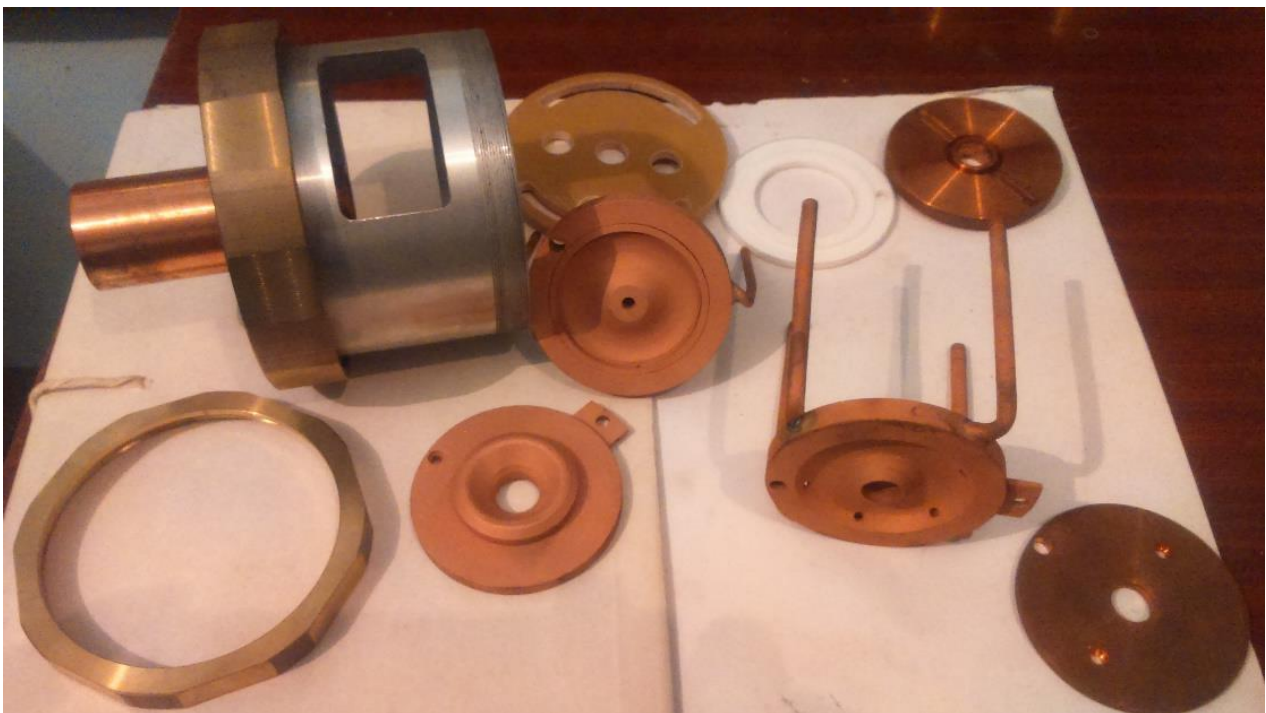
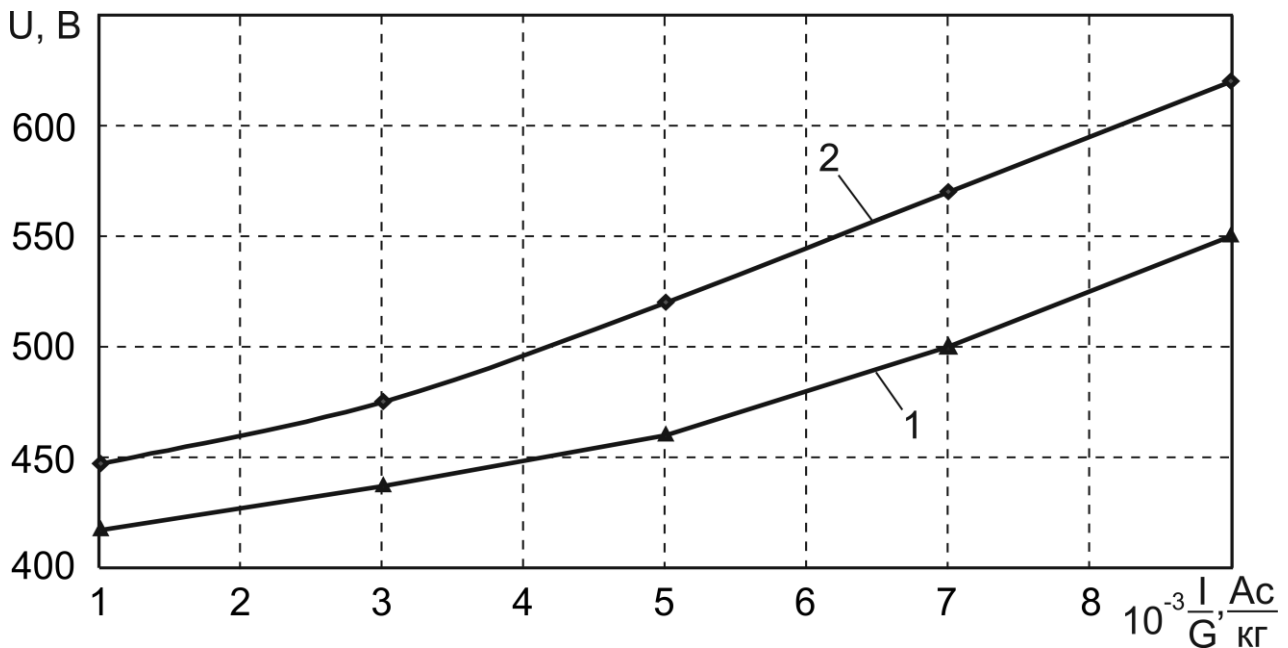


Рисунок 4 – Модифікований плазмогенератор

У результаті запусків модифікованого плазмотрона в складі експериментальної установки для газифікації сировини було отримано вольт-амперні характеристики в умовах роботи з атмосферним і надлишковим тиском (рис. 5). Як і слід було очікувати, в умовах наявності надлишкового тиску на зрізі сопла плазмотрона стає горіння електричної дуги забезпечується при більших значеннях робочого напруження. Таким чином, у випадку заданих параметрів газифікатора, насамперед складу газу та його масової витрати та вимог до ступеня очищення синтез-газу від твердої фракції, описаний підхід дозволяє не тільки розрахувати робочі параметри сепаратора циклонного типу та його геометричні характеристики, але й електричні параметри джерела

живлення. Це дозволяє отримати інформацію, необхідну для подальшого розроблення алгоритмів роботи автоматизованої системи управління установки плазмової газифікації сировини.



- 1 – робота в умовах атмосферного тиску;
2 – робота в умовах надлишкового тиску – 2 кПа

Рисунок 5 – Вольт-амперна характеристика модифікованого плазмотрона

Після виходу установки на стаціонарний режим роботи було виконано забори проб газу з подальшим їх аналізом на газоаналізаторі (результати зведено в табл. 2), спочатку установка працювала без вмикання плазмогенератора, а вихід установки на робочий режим контролювався за факелом полум'я на виході газифікатора, після виконання необхідних вимірювань відбувалося вмикання плазмогенератора і вимірювання повторювалися. Для двох режимів роботи установки було отримано якісну картину вмісту смол на виході апарата (рис. 6). Для якісного оцінювання смоляних домішок на виході газифікатора було встановлено рамки з декількома шарами з марлевої тканини.

Як видно з результатів підвищення температури проходження процесу за рахунок додаткового джерела енергії у вигляді плазмогенератора зменшує кількість смоляних домішок завдяки їх деструкції у камері газифікатора.

Порівняльні характеристики складу газу при роботі установки газифікації з використанням плазмогенератора і без нього наведено на рис. 7.

Таблиця 2 – Результати компонентного аналізу синтез-газу, отриманого при роботі з увімкненим плазмогенератором і без нього

№	CO, %	CO ₂ , %	H ₂ , %
1	19,10	8,50	13,30
2	19,50	8,20	13,50
3	19,30	8,30	13,40
4	19,60	8,40	13,30
5	19,50	8,20	13,40
6 (плазма)	27,00	5,00	15,10
7 (плазма)	26,90	4,90	15,00
8 (плазма)	27,00	4,95	15,03
9 (плазма)	27,30	5,03	15,30
10 (плазма)	27,10	5,00	15,10



а



б

Рисунок 6 – Якісна картина вмісту смол у генераторному газі при роботі без плазмо генератора (а) та з увімкненим (б) плазмогенератором

Згідно з емпіричною залежністю, наведеною в роботі [7], нижчу теплотворну здатність суміші газів можна приблизно визначити, використовуючи залежність:

$$Q_H = 25,8H_2 + 30,2CO + 85,6CH_4 + 152,3C_2H_6 + 218,0C_3H_8 + 283,4C_4H_{10} + 348,9C_5H_{12} + 133,8C_2H_2 + 141,1C_2H_4 + 205,4C_3H_6 + 271,1C_4H_8 + 330,6C_5H_{10} + 335,3C_6H_6 + 55,9H_2S, \text{ ккал/м}^3,$$

де H₂, CO, CH₄ та ін. – проценти об'ємного вмісту газу у суміші.

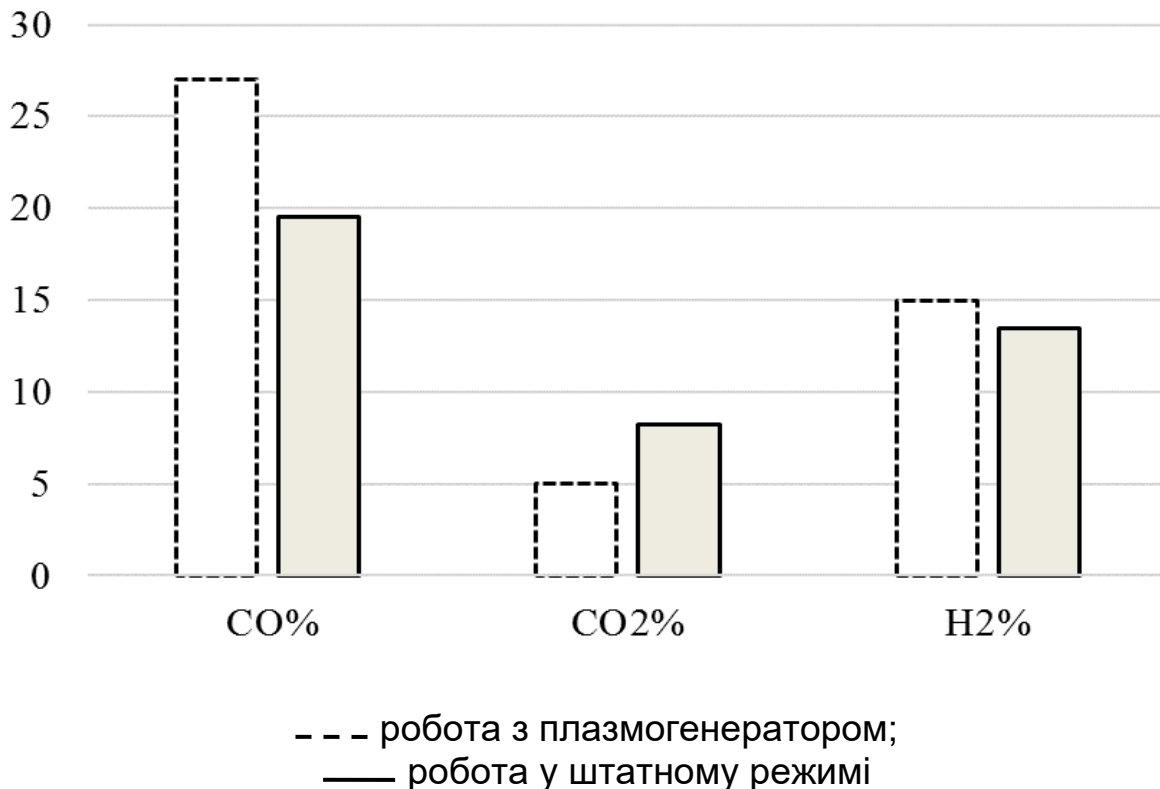


Рисунок 7 – Кількісний склад газу на виході газогенератору

Виходячи з цієї залежності і враховуючи, що у синтез-газі, який утворювався під час експериментів з горючих компонентів, містився тільки H_2 та CO , з урахуванням даних табл. 2 щодо співвідношення компонентів суміші при роботі, з увімкненим плазмо генератором і без нього можна визначити, що при вмиканні плазмогенератора отриманий синтез-газ має теплотворну здатність більшу в середньому на 30 %.

Виходячи зі значення масової витрати синтез-газу, що виробляється у газифікаторі та спираючись на оцінки збільшення його теплотворної здатності, маючи дані щодо електричної потужності плазмогенератора, можна визначити енергетичну доцільність його використання додаткового включення для збільшення питомого виходу горючих складових синтез-газу.

Висновки

1. Під час досліджень особливостей роботи плазмогенератора, що входить до складу комплексу для перероблення сировини, виявлено високий рівень ерозії катодних вставок, насамперед це обумовлено контрагуванням електричної дуги до поверхні катодної вставки з локальними підвищеннями питомих теплових потоків, що спричинено в першу чергу утворенням зворотних течій. Візуальний аналіз поверхні катодної вставки модифікованого плазмогенератора не виявив слідів

ерозії, що підтверджує правильність запропонованих для проектування методик.

2. Виконано порівняльну характеристику складу газу на виході газифікатора з урахуванням роботи плазмогенератора та у базовому режимі. Показано, що додаткове інтенсивне джерело енергії суттєво покращує процент виходу синтез-газу та підвищує його сумарну калорійність. Якісний аналіз смоляних домішок на виході газифікатора демонструє зменшення кількості смоляних домішок за умови роботи плазмогенератора.

3. Отримано вольт-амперні характеристики для модифікованої моделі плазмогенератора в умовах роботи при атмосферному та надлишковому тиску. Це дозволяє отримати інформацію, необхідну для подальшого розроблення алгоритмів роботи автоматизованої системи управління установки плазмової газифікації сировини.

4. Виходячи зі складу синтез-газу, який утворювався під час експериментів з увімкненим плазмогенератором можна визначити, що при вмиканні плазмогенератора отриманий синтез-газ має теплотворну здатність більшу в середньому на 30 %. Враховуючи значення масової витрати синтез-газу та маючи дані щодо електричної потужності плазмогенератора, можна визначити енергетичну доцільність його використання для збільшення виходу горючих складових синтез-газу.

Список використаних джерел

1. Жуков, М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы [Текст] / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков // Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1975. 298 с.
2. Жуков, М.Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) [Текст] / М.Ф. Жуков, В.Я. Смоляков, Б.А. Урюков // М. : Наука, 1973. 232 с.
3. Даутов, Г.Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами [Текст] / Г.Ю. Даутов, В.Л. Дзюба, И.Н. Карп // Киев: Наукова думка, 1984. 168 с.
4. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach / P. R. Spalart, W. H. Jou, M. Strelets, S. R. Allmaras // Proceedings of First AFOSR International Conference on DNS/LES (Ruston, Aug. 4–8, 1997). Greyden Press, 1997. P. 137–147.
5. Алкиб, А.М. Интеграция плазмагенератора в состав установки газификации [Текст] / А.М. Алкиб // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2016. Вып. 4. С. 123–127.
6. Алкиб, А.М. Планковский С. И. Компонентный анализ газа в установке газификации угля [Текст] / А.М. Алкиб // Проблемы створення

та забезпечення життєвого циклу авіа-ційної техніки : Міжнар. наук.-техн. конф. : тези доп. (20–21 квіт. 2016 р.) / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». Харків, 2016. С. 96.

7. Бирюлин, Ю.С., Михалкин, В.Н. Термодинамический расчет теплоты сгорания углеводородов [Электронный ресурс] // Системы безопасности СБ'2006 : материалы XVI науч.-техн. конф. (Москва, 26 окт. 2006 г.). Москва, 2006. С. 170–175. URL: <http://agps-2006.narod.ru/konf/2006/sb-2006/sec-2-06/16.2.06.pdf>. (дата обращения: 11.05.2017).

Поступила в редакцию 23.11.2017.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Планковский,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*