

УДК 533.6.01

DOI: 10.31471/2304-7399-2019-1(53)-155-162

КОМБІНОВАНА ПАРОГАЗОТУРБІННА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА З МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНОЮ ВСТАВКОЮ

М. П. Кулик

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380-50-337-74-37; e-mail: m_p_kulik@ukr.net*

Можливий вихід із критичного стану існуючих об'єктів теплової генерації ОЕС України вбачається у їх переоснащенні комбінованими парогазотурбінними енергетичними установками, особливо такими, які працюють на твердому паливі. Тверде паливо – мелене вугілля спалюється за схемою із додаткового циклонного передтопка та послідовно під'єднаній основній топці в атмосфері повітря збагаченого киснем. Атмосферне повітря збагачується киснем за допомогою мембранних розділювачів повітря до концентрації, яка не перевищує 40 % об.

Особливістю запропонованої енергетичної установки є наявність магніто-гидродинамічної вставки, яка розташована в додатковій топці та послідовно з'єднана із основною топкою, а додаткова топка виконана із подвійною рубашкою охолодження. На вході додаткової топки змішується нагріте повітря і вугільний пил з утворенням робочого тіла для МГД-генерації. Після проходження зони із сіток та коронуючих електродів заряджені частинки, пролітаючи із великою швидкістю мимо витягуючих сіток, попадають на колектор, де накопичується позитивний заряд. Цей заряд є по суті електрорушійною силою МГД-генератора, більша частина напруги йде на опір навантаження, а менша поступає на коронуючі електроди.

Завдяки підвищеному вмісту кисню температура у факелі зростає, наближаючись до значень 2 700 – 3 000 °С, а через значно меншу кількість азоту, в даній ситуації має місце понижене утворення оксидів азоту. Така реакція є ендотермічною, чим і пояснюється підвищення температури у факелі, а значить і термічний коефіцієнт корисної дії топки.

Кількість виробленої електричної енергії зростає за рахунок роботи магнітогидродинамічної вставки, при цьому кількість спаленого кам'яного вугілля не змінюється. Наряду із зростанням загального коефіцієнта корисної дії також зменшуються викиди утворених оксидів азоту, чим поліпшується екологічна ситуація в зоні розташування енергетичної установки.

Ключові слова: *парогазотурбінна установка, магнітогидродинамічна вставка, коронуючий електрод, витягуюча сітка, мембранне розділення повітря, оксиди азоту, коефіцієнт корисної дії, іонізація вугільних частинок.*

Актуальність теми. Теплова енергетика деяких країн, до числа яких слід віднести також і Україну, знаходиться в критичному стані через ряд причини. Серед них найважливішою є зношеність основного технологічного обладнання, в результаті чого зростає кількість умовного палива, необхідного для виробництва одиничної кількості [1] електричної енергії. Ще одним із негативних недоліків об'єднаної енергетичної системи України є також нестача маневрових потужностей. Спроба покривати пікові режими споживання шляхом частих зупинок і пусків вугільних блоків тільки погіршує техніко-економічні характеристики ТЕС, а також приводить до збільшення викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря.

Виходом із цієї кризової ситуації може бути переоснащення теплової енергетики на базі комбінованих парогазотурбінних установок [2], які ще до того можуть працювати на твердому паливі, зокрема на кам'яному вугіллі, якість якого постійно погіршується. Тим не менше коефіцієнт корисної таких установок суттєво вищий у порівнянні з об'єктами парової генерації, а екологічні показники підтверджують концепцію зниження забруднення навколишнього середовища. Головною перевагою таких комбінованих парогазотурбінних установок є їх висока маневровість та мобільність, що робить їх незамінними в плані покриття вікових навантажень.

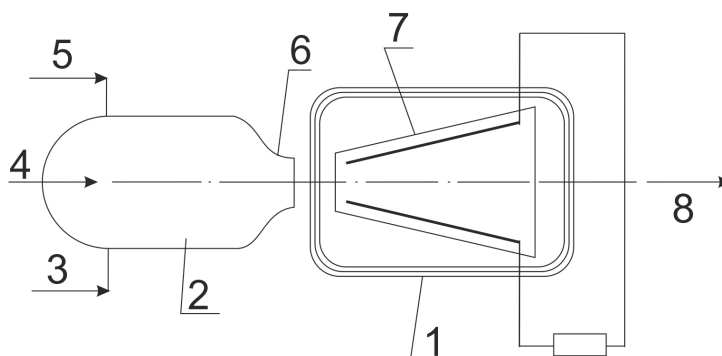
Мета статті. Вдосконалення конструкції ПГТУ в плані підвищення коефіцієнта корисної дії, а також зниження питомих валових викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря.

Аналіз стану вирішення існуючих проблем. Можливості вдосконалення таких комбінованих ПГТУ ще не повністю використовуються. Досить перспективним і ефективним є безпосереднє перетворення теплової енергії в електричну, в основі якого лежить використання електропровідного робочого середовища, як рухомого елемента електричної машини. Ще більш ніж 100 років тому Фарадеєм був сформульований закон електромагнітної індукції, згідно якого в провіднику, що рухається в магнітному полі, виникає електрорушійна сила.

Робочим тілом прямого методу перетворення енергії може бути нагрітий іонізований газ, що в принципі може забезпечити відносно високий коефіцієнт перетворення [3], а такий метод є цікавою альтернативною не тільки паротурбінним, а й газотурбінним енергетичним установкам. В цитованій роботі проведена оцінка переваг, недоліків, а також коефіцієнта перетворення (корисної дії) за означеним магніто-гідродинамічним методом генерації.

Такі перетворювачі називають МГД-генераторами, в них немає рухомих частин, що знаходяться під великим тиском, а температура робочого тіла може бути піднята до значень стійкості конструкційних матеріалів, зокрема до значень 2800 – 3000 °K, що дає можливість суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії перетворення енергії. За видом робочого тіла МГД-генератори поділяються на два види: в

одному використовується іонізований газ або плазма, а в другому як робоче тіло виступає рідкий метал. Принцип роботи МГД-генерації ілюструється рисунком 1 та описана досить зрозуміло у роботі [4].



- 1 – обмотка електромагніта; 2 – камера згоряння; 3 – подача присадки;
4 – окислювач; 5 – паливо; 6 – сопло; 7 – електроди з послідовно включеним навантаженням; 8 – вихід продуктів згоряння

Рис. 1. Принципова схема МГД-генератора

За способом відведення виробленої електроенергії МГД-генератори бувають кондукційні та індукційні. В першому випадку, виникаючий, при протіканні робочого тіла через поперечне магнітне поле, електричний струм відводиться через змінні електроди, які вмонтовані у бічні стінки каналу, на відповідне навантаження. В індукційних МГД-генераторах створюється змінне магнітне поле, що дозволяє отримати тільки змінний струм.

В обох випадках отримана потужність пропорційна електричній провідності робочого тіла, а також квадрату його швидкості та напруженості магнітного поля. Пряме перетворення теплової енергії в електричну, за відсутності рухомих частин та деталей, забезпечує досить високий коефіцієнт корисної дії (на рівні 60-65%). А відпрацьоване в МГД-генераторі робоче тіло придатне для подальшого використання при генерації електроенергії традиційними методами.

Процеси, які протікають в каналі МГД-генератора, описуються наступними, нижче наведеними виразами. На іонізовану частинку зарядом q та рухається зі швидкістю \mathbf{u} в магнітному полі, яке характеризується індукцією \mathbf{B} , діє сила

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{u} \cdot \mathbf{B}, \quad (1)$$

що можна інтерпретувати, як результат дії заряду q частинки та індукваного електричного поля напруженістю (у векторній формі)

$$\mathbf{E}_{ind} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{B}, \quad (2)$$

в результаті чого виникає електричний струм густини

$$\mathbf{J}_{ind} = \sigma \cdot \mathbf{E}_{ind}, \quad (3)$$

де σ – питома електропровідність робочого тіла (в нашому випадку продуктів згорання).

При допомозі відповідно орієнтованих електродних пластин, замкнених на зовнішнє коло, в системі протікатиме генерований струм. Таким чином, МГД-генератор є по суті джерелом постійного струму певної потужності. Залежність вихідної потужності такого пристрою від густини струму, як показано в [3], має параболічний характер. При цьому, його коефіцієнт навантаження визначається як відношення енергії, яка відбирається в зовнішньому колі, до повної енергії, яка генерується за одиницю часу в каналі МГД-генератора, має оптимум на рівні 0,5.

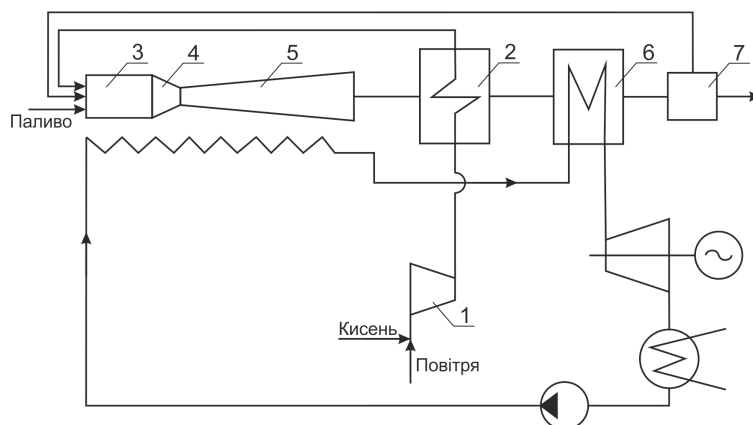
Точне обчислення коефіцієнта корисної дії магнітогідродинамічного перетворення теплової енергії в електричну є досить складним завданням. Однак, такий к.к.д. може бути досить високим при дотриманні наступних додаткових умов:

- високої електропровідності робочого тіла;
- високої індукції магнітного поля;
- великих значень теплоємності та кінематичної в'язкості робочого тіла;
- максимально можливій температурі газу на вході в МГД-канал та мінімально можливій на виході із нього;
- високій швидкості потоку робочого тіла (великі значення числа Маха).

В тепловій енергетиці найбільш перспективними є МГД-установки відкритого типу, що працюють на продуктах згорання органічного палива. На рис. 2 наведено принципову технологічну схему відкритого типу з використанням на виході МГД-генератора паротурбінної установки.

Повітря, збагачене киснем, компресором подається в теплообмінник, а потім в камеру згорання, куди поступає також паливо та іонізуюча присадка. Продукти згорання в соплі розганяються до високих швидкостей і проходять в канал МГД-генератора, де додатково проходить адіабатичне розширюється, при цьому реалізується перетворення кінетичної енергії струменя газового потоку в електроенергію. Температура газів в камері згорання може сягати значень 2800–3000 °К, на виході МГД-генератора – біля 2300 °К. Продукти згорання використовуються в теплообміннику для підігріву повітря і далі, маючи ще високу температуру, поступають в котел, де віддають теплоту воді, а також перегрітій водяній парі, яка є робочим тілом другого замкнутого паротурбінного контура.

На виході із котла продукти згорання проходять через систему очищення, де іонізуюча присадка вловлюється і знову подається в камеру згорання, а продукти згорання викидаються в атмосферу через



1 – компресор; 2 – теплообмінник; 3 – камера згорання; 4 – сопло; 5 – канал МГД-генератора; 6 – котел; 7 – система очистки димових газів

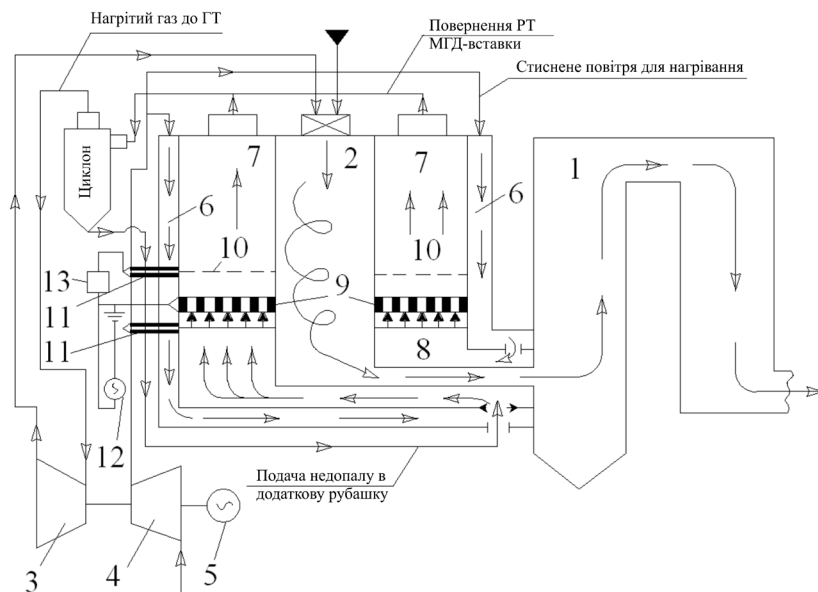
Рис. 2. Принципова схема МГД-генератора з використанням теплоти газів з його виходу в паротурбінній установці

димову трубу. Конденсат другого паротурбінного контура використовується для охолодження камери згорання, сопла і каналу МГД-генератора, а отримана теплота використовується в паротурбінному циклі.

Для такої схеми розрахункове значення коефіцієнту корисної дії лежить в діапазоні 47-50 %, але за рахунок вдосконалення технології це значення може зрости до 60-65%.

Суть запропонованого технічного рішення. В роботі [6] автори запропонували оригінальне поєднання парової і газової генерації електричної енергії із прямим перетворенням кінетичної енергії газового іонізованого потоку в електричну з використанням МГД-методу генерації. Принципову схему такої комбінованої парогазо-турбінної установки з магнітогідродинамічною вставкою наведено на рис. 3. Парогазо-турбінний блок включає котельний агрегат із основної топки та виконаною з рубашкою охолодження додатковою топкою, парову турбіну з електрогенератором, газотурбінну установку з компресором, газовою турбіною і своїм окремим генератором. Компресор своїм виходом підключений через рубашку додаткової топки до газової турбіни, яка своїм вихлопом під'єднана до котельного агрегата. Рубашка охолодження додаткової топки має два відділення: основне – зовнішнє, а також додаткове – внутрішнє. В кільцевому зазорі розташовується магнітогідродинамічна вставка, яка складається із джерела живлення, іонізуючої сітки, витягаючої сітки-електрода, колектора та опору навантаження. Повітря, збагачене киснем та стиснуте компресором, поступає в основну (зовнішню) рубашку додаткової топки, де нагрівається, а потім поступає у додаткову (внутрішню) рубашку додаткової топки. У початковій зоні внутрішньої рубашки проходить змішування нагрітого повітря з пилом для утворення робочого тіла для

МГД-генерації. Ця суміш поступає в зону іонізуючої сітки з коронуючими електродами, де проходить утворення заряджених частинок, які пролітають з великою швидкістю зону витягаючої сітки попадають на колектор, накопичуючи заряд. Тим самим потенціал колектора зростає, а різниця потенціалів між колектором і іонізуючою сіткою є електрорушійною силою МГД-генератора (магнітогідродинамічної вставки).



- 1 – основна топка; 2 – додаткова топка; 3 – газова турбіна; 4 – компресор;
 5 – електрогенератор; 6 – основна повітряна рубашка додаткової топки 2;
 7 – додаткова повітряна рубашка додаткової топки 2, 8 – іонізуюча сітка;
 9 – витягувач-електрод; 10 – колектор; 11 – вивідний електрод;
 12 – джерело живлення високої напруги; 13 – опір навантаження

Рис. 3. Принципова схема комбінованої парогазотурбінної установки з магнітогідродинамічною вставкою

Ця електрорушійна сила (вірніше напруга) за допомогою вивідних електродів підводиться до опору навантаження, а менша її частина через високовольтне джерело живлення знову подається за допомогою відповідних електродів на іонізуючу сітку з коронуючими електродами.

Частинки запиленого нагрітого газового потоку, проходячи через колектор, втрачають свій заряд, будучи вже нейтральними, покидають кільцеву рубашку (внутрішню) додаткової топки та поступають на тангенціальний вхід циклона. Після очищення повітря з високими значеннями температури та тиску поступає на газову турбіну, вихлоп якої іде на інтенсифікацію горіння вугільного пилу в додатковій топці. Пил недопалу, який збирається в нижній частині циклону, іде на створення пилеповітряного потоку для іонізації, тобто для створення робочого тіла для магнітогідродинамічної вставки.

Висновки. У запропонованій комбінованій парогазовій енергетичній установці з магніто-гідродинамічною вставкою реалізується три різних методи генерації електричної енергії: паровий за звичною схемою, газовий (робоче тіло для газового циклу утворюється у зовнішній рубашці додаткової топки), а також пряме перетворення теплової енергії в електричну МГД-методом. Необхідно зауважити, що установка забезпечує отримання додаткової кількості електроенергії без збільшення кількості спалюваного вугілля. За попередніми оцінками загальний коефіцієнт корисної дії енергетичної установки може бути в діапазоні 55–60 %.

Література

1. Вольчин І.А. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України / І.А. Вольчин, Н.І. Дунаєвська, Л.С. Гапонич, М.В.Чернявський, О.І. Топал, Я.І. Засядьмо. – Київ: "Гнозіс", 2013. – 308 с.
2. Кулик М.П. Перспективи інтенсивного відновлення теплової енергетики України на базі комбінованих парогазових енергетичних установок. / М.П. Кулик, Й.С. Мисак // Прикарпатський Вісник НТШ. Число.– 2017. – №1(37). – С. 277-295.
3. Дэвинс Д. Энергия. /Д. Дэвинс. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.
4. Клушин Ю.А. Тепловые электрические станции. / Ю.А. Клушин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 145 с.
5. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. / В.Я. Рыжкин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 325 с.
6. Грінченко Д.М. Енергетична установка. / Д.М. Грінченко, М.П. Кулик, В.В. Мудрицький. Патент України № 18408 (на винахід). Бюл. №6, 1997 р.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 12.09.2019 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Михайлівим М.І.,
д.т.н., професором Сегедою М.С. (м. Львів)*

COMBINED STEAM AND GAS TURBINE POWER UNIT WITH MAGNETIC HYDRODYNAMIC INSERT

M. P. Kulyk

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska St.;*
tel. + 38050-337-74-37; e-mail: m_p_kulik@ukr.net

A possible way out of the critical state of existing thermal power generation facilities of Ukrainian IPS (Integrated Power System) is seen in their refurbishment with combined steam and gas turbine power units, especially with those operating on solid fuel. Solid fuel, namely ground coal is burned according to scheme from an additional cyclone extended furnace sequen-

tially connected to the main furnace using atmospheric air enriched with oxygen. Atmospheric air is enriched with oxygen by means of membrane air separators to the concentration of up to 40% vol.

The peculiarity of the proposed power unit is presence of a magnetic hydrodynamic insert, which is located in the additional furnace sequentially connected to the main furnace, the additional furnace is made with a double cooling jacket. Heated air and coal dust is mixed in the additional furnace inlet to form a working fluid for MHD generation. After passing the area of nets and crown electrodes, the charged particles, flying at high speed past the extracting nets, reach a collector where positive charge is accumulated. This charge is essentially the electromotive force of MHD generator, the bigger part of voltage goes on load resistance and smaller part comes to crown electrodes.

Due to the increased oxygen content, the flare temperature increases, approaching 2700-3000 °C, and due to a much smaller amount of nitrogen, formation of nitrogen oxides is decreased. This reaction is endothermic, which explains increase of the flare temperature, and therefore, increase of thermal efficiency of the furnace.

The amount of generated electricity is increased due to the work of the magnetic hydrodynamic insert, while amount of coal burned is not changed. Along with the increase of overall efficiency, the emissions of formed nitrogen oxides are decreased, which improves environmental situation in the power unit location.

Key words: steam and gas turbine unit, magnetic hydrodynamic insert, crown electrode, retractor net, membrane air separation, nitrogen oxides, efficiency, ionization of coal particles.